

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Informatique

Ecole Doctorale : I2S – Information, Structure, Systèmes

présentée et soutenue publiquement

par

Pierre Bommel

Le 7 mai 2009

Titre :

**Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles
multi-agents adaptée à la gestion des ressources renouvelables**

JURY

M. Jean-Pierre BRIOT, CNRS - Université de Paris 6
Mme Léna SANDERS, CNRS - UMR 8504
M. Jacques FERBER, Université de Montpellier 2
M. François BOUSQUET, CIRAD
M. Jean-François TOURRAND, CIRAD

Président et Rapporteur
Rapporteur
Directeur de Thèse
Examineur
Examineur

Remerciements

L'aboutissement d'une thèse est souvent le résultat d'une aventure individuelle. Pour ma part, cette aventure a commencé il y a 18 ans lorsque j'ai décidé de reprendre mes études universitaires. J'avais alors en tête de faire de la recherche pour continuer à apprendre et réfléchir. Bref pour essayer d'être un peu moins idiot ! Ne pas travailler uniquement pour gagner sa vie (car ma vie, je l'avais déjà !) mais aussi pour contribuer à ma petite échelle à faire avancer les choses en ce Monde. Mais cette reprise n'a pas toujours été sans embuches, car à 25 ans on est déjà considéré comme « trop vieux ». Néanmoins, cette aventure a été possible et je tiens d'abord à remercier les institutions françaises qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici :

Le rectorat de Rouen qui m'a permis d'avoir un poste de surveillant pendant 5 ans. C'est une grande chance que de permettre à des étudiants de travailler dans de telles conditions. J'ai entre autre une pensée affective pour Joseph Puccini, qui fut un CPE « hors pair » au LEP de Bolbec. J'ai découvert à ses côtés le plaisir d'éduquer tout en écoutant les élèves. Espérons que le « pionnicat » perdure pour que d'autres puissent aussi bénéficier de ce soutien.

J'ai aussi eu la chance de recevoir une allocation du CREUFOP pour faire mon DESS (après mon DEA). A ce sujet, je voudrais remercier tout particulièrement Thérèse Libourel pour m'avoir accueilli dans le DESS IAO qu'elle dirigeait à l'UM2 et pour sa générosité. Suivre cette année d'étude a été pour moi une véritable aubaine.

Et bien sûr, je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'égard du CIRAD qui est à mes yeux un organisme de recherche sans équivalent. Il offre la possibilité de mener des recherches pluridisciplinaires en s'investissant sur les problèmes de développement, tout en favorisant le partenariat. Le CIRAD a osé le pari de me recruter en 2001 alors que je n'avais pas de thèse et que mes perspectives de continuer dans la recherche s'assombrissaient. Je dois aussi cette embauche au programme politique des « 35 heures » ; programme tant décrié qui a permis de créer un grand nombre d'emplois dont le recrutement de 100 personnes au CIRAD (grâce aussi aux efforts salariaux des ciradiens). J'ai, depuis, l'immense plaisir de faire partie de cette équipe de rêve, la Green Team ! Depuis 2001, mon enthousiasme pour faire avancer les problématiques de cette équipe et mon attachement envers le Cirad n'ont pas faibli.

Au-delà des institutions, il y a bien sûr des personnes. Je tiens donc à remercier Jacques Ferber. Il a pris le risque d'être mon directeur en me faisant confiance sur le déroulement de cette thèse et en me considérant dès le début comme un collègue et non pas comme un étudiant. Merci Jacques aussi pour nos échanges philosophiques et pour ton amitié.

Un très grand MERCI à Jean-François Tourrand pour m'avoir permis de reprendre à zéro ce sujet de thèse et en m'encourageant constamment. A la manière d'un avant du Stade Toulousain, il a pris sur lui toutes les charges et tous les coups afin de créer un appel d'air derrière lui et de me permettre de prendre l'intervalle. Grâce à toi, l'essai est transformé JFT !

Je reste encore sans voie tellement les deux rapports qu'ils ont rédigé sont élogieux. Je remercie donc sincèrement Léna Sanders de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteur de ce travail. Je lui suis aussi redevable de m'avoir ensuite intégré à l'atelier du CNRS qu'elle dirige pour réfléchir sur le problème de validation des modèles.

Je tiens également à remercier chaleureusement Jean-Pierre Briot pour avoir accepté de présider ce jury, ainsi que d'avoir rapporté ce travail. J'espère Jean-Pierre que nos chemins se croiseront encore souvent au Brésil.

Je suis également reconnaissant à François Bousquet d'avoir accepté de faire partie de mon jury, mais aussi pour tous ses conseils toujours avisés et judicieux. Et merci surtout pour tout ce que je te dois, tes engagements et ton amitié.

En nous embauchant, Denis et moi, comme vacataires à l'INRA, Sylvie Lardon nous a véritablement maintenu la tête hors de l'eau pendant un an. Je l'en remercie du fond du cœur. C'est aussi elle qui m'a ouvert les yeux sur l'intérêt des dynamiques des objets spatiaux.

J'ai été initié aux SMA et à la gestion des ressources pendant mon stage de DEA à l'IRD par Jean Le Fur qui a été l'un des pionniers dans ce domaine. C'est également avec lui que nous nous sommes interrogés sur le problème de la validation de ces outils.

Il serait trop long d'énumérer tous les ciradiens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et d'échanger, et qui m'ont soutenu. Martine et Denis, c'est bien plus qu'un merci que je vous dois pour m'avoir porté à bout de bras ces derniers moments avant la soutenance. Christophe, William's, Jean-Pierre, Patrick D'A., Stefano, Aurélie, Sylvain, Raphaëlle, Sigrid, Grégoire, Guy, Marie-Gabrielle, Didier, Patrick C., Jérôme, Pascal et la bande de Brasília, les deux Eric, Patrick, Plinio, Philippe, Pierre et René, je vous remercie plus encore à titre d'amis que de collègues.

Um obrigadão também à todos os meus parceiros e amigos sul-americanos que sempre apoiaram-me e provaram-me a confiança deles : Hermès, Laura, Paulo, Brasil, Silvina, Valéria, Manuela, Tienne, Soraya, Lívia, Jorge, Pedro, Doris-qui-ne-retournera-plus-a-4000m, Bernardo-que-je-retrouverai-a-4000m...

Mes remerciements chaleureux également à mes collègues non-ciradiens attentifs à ce travail, Michel, Alassane, Géraldine, Olivier, Thierry, Robert, Annie, Claude...

Sans compter tous les participants du cours SMA qui ont essuyé la mise en place de cette méthodologie présentée ici. Je tiens ici à les en remercier.

Merci à mes amis de toujours pour leur soutien infailible, Monjax, Yvan, Aurélie, Fabrice, Patrice, ... et une pensée particulière à Stéphane qui a accompagné une partie de ce parcours.

Merci à Ilinka, Babu et Nicole et à mes sœurs Barbara, Sandra, Isabelle et Ioana, qui ont fait ce que je suis devenu.

Toutes mes excuses Youri, Anton et Ilan qui ont dû supporter les ronchonnements et les angoisses d'un papa pas toujours à leur écoute. Il faudra essayer de rattraper toutes ces parties de foot perdues !

J'exprime tout mon amour à Laure sans qui je n'aurai pu parcourir ce long chemin. Elle est aussi la seule à avoir corrigé ce manuscrit de fond en comble. En me poussant dans mes ultimes retranchements, elle a toujours su pointer mes incohérences... et c'est aussi comme ça dans la vie !

A la mémoire de Vincent Ginot et Louise Erasmus, partis trop tôt...

... j'ai une pensée émue pour leur famille

PLAN

INTRODUCTION.....	12
1.1 PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE	12
1.1.1 La validation des modèles multi-agents	12
1.1.2 La fiabilité des modèles multi-agents	14
1.1.3 La réplication et la lisibilité des modèles multi-agents	14
1.2 LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES	16
1.2.1 La gestion des ressources renouvelables nécessite une approche transdisciplinaire	16
1.2.2 Le développement durable.....	17
1.2.3 Une posture originale pour appuyer le développement durable	18
1.2.4 Intégrer les connaissances pour accompagner la décision	19
1.3 OBJECTIF DE LA THESE	20
1.4 ORGANISATION DU DOCUMENT.....	21
PREMIERE PARTIE : ROLE, EVALUATION ET USAGES DE LA MODELISATION MULTI-AGENT POUR L'AIDE A LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES	22
CHAPITRE 1 QUE SIGNIFIE LA VALIDATION D'UN MODELE ?.....	23
1.1 DEFINITIONS DE VALIDATION ET SES SOUS-ENTENDUS	23
1.2 QUE PROUVE UN BON AJUSTEMENT A DES DONNEES ?	24
1.3 LA QUESTION DE LA PREUVE ET DE LA VERITE.....	26
1.3.1 La vérité du rat superstitieux.....	26
1.3.2 Petit détour du côté de l'épistémologie.....	28
1.4 DISCUSSION : EVALUATION DES MODELES.....	34
1.4.1 Pas de validation définitive	34
1.4.2 Modèles Ad Hoc	35
1.4.3 La valeur informative du modèle.....	36
1.4.4 La confirmation d'anticipation	36
1.4.5 Alignement de modèles	37
1.5 CONCLUSION DU CHAPITRE.....	37
CHAPITRE 2 POURQUOI MODELISER ?.....	39
2.1 ROLE ET STATUT DES MODELES	39
2.1.1 Modèles prédictifs et modèles explicatifs	39
2.1.2 L'origine étymologique de « modèle » possède deux significations	39
2.2 MODELISER POUR IMITER ?.....	40
2.3 MODELISER POUR PREDIRE ?.....	41
2.3.1 Déterminisme et sciences prédictives	41
2.3.2 Déterminisme et hasard : théorie du chaos déterministe	42
2.3.3 Démarches prospectives pour découvrir le champ des possibles.....	42
2.4 MODELISER POUR GENERER DES SCENARIOS PROSPECTIFS	43
2.5 MODELISER POUR COMPRENDRE : UN MODELE JOUE LE ROLE DE FILTRE DISCRIMINANT.....	46
2.5.1 Le modèle, filtre discriminant pour résumer la réalité en une photo plus explicite	46
2.5.2 Un filtre discriminant selon les points de vue.....	48
2.6 DU FILTRE PASSIF A L'AFFIRMATION D'UN REGARD CONSTRUIT	49
2.7 MODELISER POUR APPRENDRE.....	51
2.7.1 Nous pensons par modèles	51
2.7.2 La modélisation est un processus itératif d'apprentissage	52
2.8 LE QUESTIONNEMENT, POINT D'ENTREE DE LA MODELISATION	53
2.8.1 Le modèle scientifique repose sur une question	53
2.8.2 La modélisation a pour rôle de proposer des questions	54
2.9 CONCLUSION DU CHAPITRE.....	55
2.9.1 Un modèle n'est pas neutre.....	55
2.9.2 La modélisation commence par des questions.....	56
2.9.3 Générer des scénarios pour anticiper des futurs possibles	56
CHAPITRE 3 LES AVANTAGES DE LA MODELISATION MULTI-AGENT	57
3.1 LES GRANDES CATEGORIES DE MODELES DE SIMULATION	57
3.1.1 Modèles mathématiques et prise en compte des interactions	58
3.1.2 Modèles multi-agents et modèles individus-centrés	60

3.2	DEFINITIONS DES AGENTS ET DES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....	61
3.3	SMA ET ORGANISATION	63
3.4	LES RELATIONS ENTRE LES NOTIONS D'AGENT ET D'OBJET	65
3.5	LES SMA SONT PARTICULIEREMENT ADAPTES A L' AIDE A LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES	66
3.5.1	Aborder la complexité par une démarche de modélisation systémique.....	66
3.5.2	Importance de l'espace et des interactions en écologie.....	68
3.5.3	Coupler les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales pour la gestion des ressources renouvelables	70
3.6	COMMOD : LA MODELISATION COMME OBJET DE MEDIATION.....	72
3.6.1	De l'aide à la décision pour piloter un système... ..	72
3.6.2	... à l'accompagnement du processus de décision.....	73
3.6.3	Générer des scénarios exploratoires par simulation interactive.....	76
3.7	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	77
CHAPITRE 4 LE STATUT DE LA SIMULATION ET SES CONSEQUENCES POUR LA « VALIDATION » DES SYSTEMES MULTI-AGENTS.....		78
4.1	DISTINGUER "MODELE" ET "SIMULATION"	78
4.2	LA SIMULATION REVELE L'IMPORTANCE DU TEMPS.....	79
4.2.1	Prise en compte progressive du temps dans les modèles.....	79
4.2.2	Distribution des interactions au cours du temps	80
4.3	LA SIMULATION REVELE LA COMPLEXITE	80
4.3.1	La complexité selon Von Neumann.....	80
4.3.2	ECEC : un exemple de modèle simple et de résultats non triviaux	80
4.4	LA SIMULATION : UNE EXPERIENCE INCOMPRESSIBLE.....	82
4.4.1	Une expérience sans raccourci... ..	82
4.4.2	... qui ne peut se démontrer.....	83
4.5	LA SIMULATION ET LA NOTION D'EMERGENCE	85
4.5.1	Préambule	85
4.5.2	Une notion délicate qui lie un phénomène global à des comportements individuels	86
4.5.3	Surprise et observateur.....	86
4.5.4	Définition édifiante de l'émergence	87
4.5.5	Emergence faible – émergence forte	88
4.5.6	Auto-organisation et autonomie	89
4.6	DISCUSSION : LA SIMULATION ET SES CONSEQUENCES POUR LA "VALIDATION" DES SYSTEMES MULTI-AGENTS	90
4.6.1	Importance de distinguer "modèle", "simulation" et "simulateur".....	90
4.6.2	Vérification et "validation" : "Building the model right" et "Building the right model"	91
4.6.3	Fiabilité du simulateur	93
4.6.4	Réplication et alignement de modèles	94
4.6.5	La lisibilité des modèles multi-agents.....	95
4.6.6	Traçabilité et robustesse du modèle	95
4.6.7	Autonomie et modèle Ad Hoc	95
4.7	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	96
DEUXIEME PARTIE : LES ARTEFACTS LIES A LA GESTION DU TEMPS ET DES INTERACTIONS..		97
CHAPITRE 5 GESTION DU TEMPS DANS LES SIMULATIONS		98
5.1	LES TEMPS	98
5.2	TEMPS DISCRET ET TEMPS CONTINU DES MODELES MATHEMATIQUES.....	98
5.2.1	Modèles à temps continu	98
5.2.2	Exemple de modèle à temps continu : le modèle de Verhulst.....	99
5.2.3	Modèles à temps discret : Systèmes dynamiques discrets	101
5.2.4	Exemple de modèle à temps discret : équation logistique discrète.....	102
5.2.5	Alors... discret ou continue ?	103
5.3	LES POLITIQUES DE GESTION DU TEMPS DES SMA	105
5.3.1	Les modèles à événements discrets : simulation dirigée par les événements	105
5.3.2	Les modèles à pas de temps : simulation dirigée par l'horloge.....	111
5.3.3	Biais liés à la séquentialisation du temps.....	115
5.3.4	Alors... gestion événementielle ou par horloge ?	125
5.3.5	Résolution de conflit : aucune politique de gestion n'y échappe	129
5.3.6	Les plates-formes multiprocesseurs ne constituent pas une solution	129
5.3.7	Problème de simultanéité ou problème d'interaction ?	131
5.3.8	Un exemple : le pompier incompetent.....	131

5.4	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	137
CHAPITRE 6	LA NOTION D'AUTONOMIE	138
6.1	QUELLES AUTONOMIES ?	138
6.1.1	Autonomie biologique et sociale.....	138
6.1.2	Autonomie informatique	140
6.2	AUTONOMIE FORTE : PROTEGER L'INTEGRITE INFORMATIQUE DE L'AGENT	142
6.2.1	Action de l'agent : manipulation directe de l'environnement	142
6.2.2	Principe "Influences-Réaction" : séparer le geste et le résultat du geste	142
6.2.3	Principe "Influences-Réaction" renforcé : séparer le corps et l'esprit	145
6.2.4	Réification des interactions : le modèle MIC* {Mouvement Interaction Calcul}*	149
6.3	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	151
CHAPITRE 7	GESTION DES INTERACTIONS APPLIQUEE AUX MODELES DES RESSOURCES RENOUVELABLES.....	153
7.1	QUELLES INTERACTIONS ?	153
7.1.1	Actions simultanées	153
7.1.2	Interactions Co-X.....	154
7.1.3	Actes de langages	155
7.1.4	Protocoles d'interaction	155
7.2	INTERACTION FORTE – INTERACTION FAIBLE	157
7.2.1	Modèle de reproduction croisée : interaction forte.....	157
7.2.2	Modèle de consommation d'une ressource commune : interaction faible	161
7.2.3	Modèle sans interaction	168
7.3	DISCUSSION	169
7.4	CONCLUSION	171
TROISEME PARTIE : AMELIORER LA FIABILITE ET LA LISIBILITE DES MODELES MULTI- AGENTS.....		173
CHAPITRE 8	EXPLORATION DES MODELES.....	174
8.1	ANALYSE DE LA STRUCTURE : VERIFIER LA COHERENCE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS	175
8.2	ANALYSE DE SENSIBILITE	177
8.2.1	Choix des indicateurs (sondes).....	177
8.2.2	Enquête sur un modèle	179
8.2.3	Sensibilité locale.....	179
8.2.4	Sensibilité globale	192
8.3	ANALYSE DES CONFIGURATIONS INITIALES	195
8.3.1	Niveau initial d'énergie des plantes du modèle ECEC	195
8.3.2	Fragmentation de l'espace.....	196
8.4	DISCUSSION	200
8.4.1	Vérifier, comprendre et simplifier	200
8.4.2	Sensibilité et robustesse.....	200
8.4.3	Importance des configurations initiales	201
8.5	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	202
CHAPITRE 9	DECRIRE POUR PERMETTRE LA CRITIQUE ET LA REPLICATION	204
9.1	LA REPLICATION : UNE NECESSITE POUR TOUTE DEMARCHE SCIENTIFIQUE	204
9.1.1	Pourquoi répliquer ?	204
9.1.2	Répliquer des résultats de simulations à partir de spécifications	205
9.1.3	Exemple : [Rouchier, 2003] à partir des spécifications de [Duffy, 2001]	206
9.1.4	Exemple : [Rand & Wilensky, 2006] à partir des spécifications de [Axelrod & Hammond, 2003].....	207
9.1.5	Exemple : [Edmonds & Hales, 2003] à partir des spécifications de [Riolo et al. , 2001]	207
9.1.6	Qualité du générateur de nombres pseudo-aléatoires.....	209
9.1.7	Problème récurrent de la gestion du temps et des interactions.....	210
9.2	ATTENTION PARTICULIERE DANS LA DESCRIPTION DES MODELES	211
9.2.1	Une nouvelle phase dans le cycle de la modélisation.....	211
9.2.2	Protocole ODD.....	215
9.2.3	UML	216
9.3	CONCLUSION : PENSER PAR DIAGRAMME.....	222
CHAPITRE 10	CONCLUSION : DES MODELES SIMPLES, FIABLES, EXPLICITES ET REPRODUCTIBLES POUR RETROUVER LA COMPLEXITE	223

10.1	FAIBLESSES DES MODELES MULTI-AGENTS	223
10.1.1	<i>Un SMA révèle des propriétés non prouvables</i>	223
10.1.2	<i>Boite noire</i>	224
10.1.3	<i>Gestion délicate du temps et des interactions</i>	225
10.1.4	<i>"The ghost in the model"</i>	227
10.1.5	<i>Passage par le codage</i>	229
10.1.6	<i>Complexification sans fin</i>	230
10.2	KISS OU KIDS ?	230
10.2.1	<i>Préambule : l'efficacité n'implique pas la complexité</i>	230
10.2.2	<i>KIDS</i>	232
10.2.3	<i>KISS</i>	233
10.2.4	<i>Discussion</i>	234
10.2.5	<i>Modèles géographiques : modèles-cathédrales ou modèles-Kleenex ?</i>	236
10.3	DU MODELE DESCRIPTIF AU MODELE ADAPTATIF EN CIBLANT LA QUESTION DE RECHERCHE.....	238
10.4	CONCLUSION GENERALE.....	240
CHAPITRE 11 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE : EXEMPLE DU MODELE TRANSAMAZON 243		
11.1	LE CONTEXTE AMAZONIEN	243
11.2	LOCALISATION DU SITE D'ETUDE	245
11.3	OBJECTIFS DU MODELE	246
11.3.1	<i>La question de recherche, point d'entrée de la modélisation {chap. 2}</i>	246
11.3.2	<i>Autres modèles et avantages de la modélisation multi-agent {chap. 3}</i>	247
11.4	DESCRIPTION DU MODELE : OUVRIR LA BOITE NOIRE { CHAP. 9 }.....	249
11.4.1	<i>Délimitations</i>	249
11.4.2	<i>Description de la structure</i>	251
11.4.3	<i>Description des dynamiques</i>	258
11.5	GESTION DU TEMPS, DE L'AUTONOMIE ET DES INTERACTIONS {PARTIE 2}.....	260
11.5.1	<i>Un modèle sans difficultés pour l'activation des entités {chap. 6}</i>	260
11.5.2	<i>Simplification des interactions : échanges de lots par la technique du commissaire-priseur {chap. 7}</i> ..	261
11.5.3	<i>Pas de protection particulière de l'autonomie {chap. 6}</i>	262
11.6	PREMIERS RESULTATS	262
11.6.1	<i>Le simulateur</i>	262
11.6.2	<i>Exemple d'une simulation</i>	262
11.6.3	<i>Analyse de sensibilité {chap. 8}</i>	266
11.6.4	<i>Réplication</i>	269
11.7	DISCUSSION	269
11.8	PERSPECTIVES	271
11.9	CONCLUSION	271
BIBLIOGRAPHIE.....		273
ANNEXES		288
1	EXEMPLE DE MODELE MATHEMATIQUE : LE MODELE DE VOLTERRA	288
2	MODELE D'INTERACTION INDIRECTE : CONSOMMATION D'UNE RESSOURCE COMMUNE.....	291
3	LE MODELE ECEC : EVOLUTION DE LA COOPERATION DANS UN CONTEXTE ECOLOGIQUE.....	294
4	DESCRIPTIONS SUPPLEMENTAIRES DU MODELE TRANSAMAZON	298

Résumé

Les potentialités des SMA ne doivent pas cacher les difficultés qui guettent le modélisateur. Plus précisément, c'est la question de la validation des modèles qui est régulièrement soulevée. Car, contrairement aux modèles mathématiques, il est impossible de prouver les caractéristiques d'un SMA. De plus, les probabilités de faire apparaître des erreurs ou des biais ne sont pas négligeables. On peut alors légitimement s'interroger sur la fiabilité des simulateurs. Or il s'agit moins d'erreurs de codage que de problèmes de gestion approximative des interactions ou d'activation des agents qui peuvent remettre en cause cette fiabilité. Souvent sous-estimés, ces approximations produisent des artefacts et on risque d'attribuer par erreur des propriétés à un modèle.

Certaines techniques limitent l'apparition de ce genre de biais en renforçant par exemple l'autonomie des agents. En effet, en protégeant leur intégrité informatique, ces architectures empêchent les interactions directes de gré à gré. Elles obligent donc un traitement dévié vers une entité d'ordre supérieur (l'environnement ou l'univers) en charge de résoudre les interactions, les conflits et les traitements parallèles. Néanmoins, ces techniques informatiques sont contraignantes et difficiles à mettre en œuvre. Seules, elles apportent rarement de réponses satisfaisantes pour empêcher l'apparition de biais. Il importe plutôt de connaître les zones sensibles susceptibles de générer des artefacts et d'utiliser des procédures standards en les adaptant au domaine modélisé. Ceci ne veut pas dire qu'il faille sophistiquer les interactions entre les agents ou bien imposer un système particulier de gestion du temps. Au contraire, il est nécessaire d'aborder ces points sensibles en proposant des modèles simples et contrôlables et en considérant que l'activation et les interactions font partie intégrante du modèle.

La modélisation des socio-éco-systèmes n'est pas juste une spécialité informatique, mais demande un véritable savoir-faire et le modélisateur doit garder un regard critique sur ses outils. Non seulement il faut connaître par avance les points sensibles des SMA mais il faut également s'assurer de la robustesse de ses résultats en montrant que le simulateur exhibe des comportements relativement stables. La réplication indépendante du simulateur renforce encore sa fiabilité. D'ailleurs, vérifier et reproduire une expérimentation, quelle qu'elle soit, apparaît comme la règle de toute démarche scientifique rigoureuse. Mais les difficultés de la réplication sont à attribuer au manque de lisibilité des SMA. Il est donc indispensable de décrire son modèle de façon claire et non ambiguë. Après la mise en place d'un simulateur, un travail de re-présentation reste à mener pour proposer des diagrammes réorganisés qui mettent la lumière sur les points essentiels et autorisent des discussions et des critiques.

Nous défendons l'idée d'une modélisation exposée, qui doit assumer ses choix sans imposer ses points de vue. Il est urgent d'abandonner la vision naïve qui consiste à penser qu'un modèle est objectif. La notion de modèle neutre qui ne serait qu'une copie du réel *in silico*, impliquerait que le modélisateur n'a aucun présupposé sur le système qu'il étudie et que le monde se reflète dans sa pensée comme une image dans un miroir. Or, que ce soit intentionnel ou non, un modèle est forcément une représentation subjective. Il faut donc expliciter ses choix et les présenter de la façon la plus lisible possible pour qu'ils puissent être compris, partagés ou critiqués. Suite aux défauts de fiabilité des SMA et aussi à cause de démarches naïves de la modélisation, il est préférable, dans l'état actuel des SMA, d'opter pour des modèles simples plutôt qu'une approche descriptive qui chercherait à introduire dans le modèle le maximum d'informations considérées comme données par nature.

Abstract

The potentialities of the MAS should not hide the difficulties the modelisator can encounter. More precisely, the question of models validation is regularly mentioned. On the contrary of mathematical models, it is impossible to prove the characteristics of a MAS. Moreover, the probabilities of revealing errors or bugs are not negligible. One can then legitimately wonder about the reliability of the simulators. However, the main problems don't come from errors of coding but rather from the management of the interactions or activations of the agents. Often underestimated, a rough management may produce artifacts and one can give by mistake the wrong properties to a model.

Some techniques limit the emergence of this kind of bias by reinforcing for example the autonomy of the agents. Indeed, by protecting their data integrity, these architectures prevent the direct interactions between agents. Thus, they necessitate a treatment deviated towards a higher nature entity (environment or universe) in charge of solving interactions, conflicts and parallel treatments. Nevertheless, these techniques are constraining and difficult to implement. Single-handedly, they bring hardly satisfactory answers to prevent from bias appearance. It is rather important to be aware of the hot areas that are likely to generate artifacts and to use standard procedures by adapting them to the modeled field. This does not mean that it is necessary to sophisticate the interactions between the agents or to impose a particular system of time management. On the contrary, it is necessary to handle these vulnerable points by proposing simple and controllable models and by considering that activation and interaction are at the heart of a model.

The modeling of the socio-ecosystems is not just a data-processing speciality, but request a confirmed know-how and the modelisator must take a critical look at its own tools. It is necessary to know by advance the vulnerable points of the MAS but it is also necessary to improve the robustness of its results by showing that the simulator exhibits relatively stable behaviors. The independent replication of a simulator reinforces its reliability. Moreover, to check and reproduce experimentation (whatever type) appear as the rule of any rigorous scientific method. But the difficulties of replication are affected by miss readability of the MAS. It is thus essential to describe its model in a clear and non-ambiguous way. After the implementation of a simulator, a work of re-presentation must be carried out to design reorganized diagrams that put the light on the essential points of the model and authorize discussions and criticisms.

We defend the idea of an exposed modeling that must assume its choices without imposing its points of view. It is urgent to give up the naive vision which consists in thinking that a model is objective. The idea of neutral model as a simple copy of reality in silico would imply that the modelisator has no presupposed on the studied system and that the world is reflected in its thought like an image in a mirror. However, a model is inevitably a subjective representation. It is thus necessary to clarify its choices and to present them in the most readable way so that they can be understood, shared or criticized. Due to the lack of reliability of the MAS and also to the naive approaches of modeling, it is preferable, in the actual position of the MAS, to choose simple models rather than a descriptive approach which would seek to introduce into the model the maximum of information considered as given by nature.

Resumo

O paradigma multi agente que propõe uma maneira original de modelar o mundo, é considerado como um modo relevante de representação dos conhecimentos. Mas estas potencialidades não devem esconder as dificuldades que vigiam o modelizador. Frequentemente subestimadas, estas podem questionar a sua legitimidade científica. Então, a pergunta da validação dos SMA é levantada e mais especificamente a sua fiabilidade.

Contrariamente aos modelos matemáticos, um SMA não pode provar os seus resultados nem abstrair-se da simulação. No momento da passagem da sua concepção á sua aplicação, numerosos problemas podem aparecer. Alguns são ligado à erros de programação ou de cálculo, mas a maior parte provem de uma gestão aproximativa do tempo e das interações entre agentes. Arrisca-se assim atribuir por erro as propriedades de um modelo. Ora a técnica informática única não resolve estas obliquidades. O modelizador deve conhecer as zonas sensíveis susceptíveis de gerar produtos manufacturados e de considerar-o no âmbito do domínio tratado. Após ter efetuado análises exploratórias, ele controla melhor o seu sistema e é capaz de explicar todos os resultados produzidos.

Para reforçar a fiabilidade do simulador, é também necessário replicá-lo independentemente, a exemplo de qualquer procedimento científico rigoroso. Ora as dificuldades do contra-réplica são frequentemente ligadas à falta de legibilidade dos SMA. Se um esclarecimento perfeito permanecer um ideal, é indispensável apresentar um SMA de maneira clara e não ambígua com ajuda de diagramas reorganizados que põem a luz sobre os pontos essenciais e permitir discussões e críticas.

INTRODUCTION

1.1 PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

La modélisation multi-agent est devenue une activité de recherche très prisée et il n'est pas rare que des bailleurs de fonds demandent à ce qu'elle apparaisse dans les projets de recherche et de développement. Pourtant, les systèmes multi-agents (SMA), qui héritent des concepts de l'intelligence artificielle dite distribuée, sont encore récents (une vingtaine d'années). Depuis quelques temps, ils sont sortis de la sphère des sciences cognitives et informatiques et sont à présent utilisés dans de nombreux autres domaines de recherche. Ainsi, après avoir été considérés par certains comme des gadgets informatiques, leurs potentialités de modélisation quasi illimitées en font des outils maintenant reconnus et appréciés. Le paradigme multi-agent, qui propose une manière originale de modéliser "le monde", est désormais considéré comme un mode pertinent de représentation des connaissances. De plus, comparer à d'autres types de modélisation plus standard tels que les systèmes à équations, concevoir un SMA ne nécessite pas de bagage mathématique particulier et nombreux sont ceux qui pensent profiter de cette souplesse et des possibilités formidables que cette technique autorise.

Cependant, ces potentialités et cette apparente facilité ne doivent pas cacher les difficultés qui guettent le modélisateur. Il ne s'agit pas uniquement de préoccupations liées à l'apprentissage et à la maîtrise d'un langage informatique, mais bien de difficultés liées à la modélisation multi-agent en elle-même qui sont trop souvent sous-estimées voire ignorées et qui peuvent au final discréditer le domaine de la modélisation multi-agents dans son ensemble. D'ailleurs, les questions soulevées autour de la validation des modèles multi-agents traduisent cette problématique, et nombreux sont ceux qui en déplorent l'absence. À tel point qu'il est parfois avancé que ces outils ne sont tout simplement pas validables.

Il apparaît donc important de s'interroger sur la question de la validation en l'abordant plus spécifiquement sous l'angle des difficultés liées à la vérification des modèles. Car à l'instar des systèmes experts et si on n'y prend pas garde, l'engouement pour les SMA pourrait retomber comme un soufflet au fromage mal préparé.

1.1.1 La validation des modèles multi-agents

Il est fréquent, lors de l'exposé d'un modèle, que la question de la validation, qui se veut être *la* question piège dans ce domaine, soit posée, plongeant le conférencier dans un embarras bien visible. Il est alors souvent répondu que le travail présenté est inachevé et que la phase de validation doit être abordée prochainement ou que le modèle est pour l'instant trop abstrait et devrait être raffiné avant de s'intéresser à la validation. Mais cette dernière réponse est une fuite en avant si celui qui l'adopte espère atteindre un jour un modèle réduit parfait du monde qu'il étudie. La meilleure réponse consisterait plutôt à retourner la question : « Qu'entendez-vous par validation ? », « Quels sont, selon vous, les critères qui permettraient d'affirmer qu'un modèle est validé ? » [Amblard et al., 2006].

À ces questions, il sera alors généralement répondu qu'un modèle SMA est validé lorsque ses valeurs de sortie sont proches des données observées, en reprenant une méthode de validation classique des modèles descriptifs, par exemple en économétrie. Or, sans même parler des corrélations accidentelles, il existe un grand nombre de problèmes logiques, théoriques ou pratiques lorsque l'on veut comparer les sorties d'un modèle à des données empiriques.

D'ailleurs, la quantité de données nécessaires devient rapidement prodigieuse surtout si le modèle est appliqué dans le domaine des sciences humaines et sociales où les expérimentations sont difficiles à réaliser, les données collectées sujettes à caution et les campagnes de collectes, quand elles sont possibles, extrêmement coûteuses.

Certes la comparaison des résultats de simulation avec des jeux de données empiriques constitue un exercice important qui s'inscrit dans le processus d'évaluation. Mais est-ce suffisant pour conclure à la validité d'un modèle ? Un modèle peut par exemple exhiber des résultats cohérents avec des données alors même que les mécanismes qu'il met en œuvre sont clairement éloignés de ceux qu'il est supposé représenter.

Si malgré tout, on considère la comparaison à des données comme le seul critère pertinent pour décider de la validité d'un modèle, alors pourquoi la question de la validation ne se pose-t-elle pas également à toutes les catégories de modèles, c'est à dire autant aux SMA qu'aux modèles mathématiques standards ? Par exemple, le fameux modèle de Schaefer [1957] qui décrit l'évolution des captures de pêche en fonction de l'état et de la dynamique des stocks de poissons, a montré ses limites [Gilly, 1989]. Des écarts importants entre ses résultats et les données issues de campagnes de prélèvements devraient nous inciter à contester sa validité. Malgré cela, il est utilisé par de nombreux planificateurs pour estimer le niveau optimal d'exploitation [NAT, 1999] et son extension au modèle de Gordon-Schaefer est utilisée pour décider de mesures conservatoires et de politiques économiques de pêche (quotas de production, taxes sur la production ou sur l'investissement).

Par conséquent, quelle différence y a-t-il entre ce type de modèles mathématiques précédemment cités et un modèle à base d'agents ? Il nous faut donc comprendre ce qui rend la modélisation multi-agent si contestable vis-à-vis de la validation. Pourquoi le statut d'outils scientifiques est-il accordé au premier quand il est souvent refusé aux seconds ?

Certes, les modèles mathématiques de type systèmes à équations offrent la possibilité de prouver les résultats qu'ils énoncent. Toutefois, cette faculté est rarement applicable dans la pratique pour peu que les modèles soient un peu complexes. De plus, ces preuves restent internes au modèle : elles permettent uniquement de prouver ses propriétés intrinsèques (convergence, cycles, attracteurs, ...), sans montrer pour autant que celui-ci représente correctement l'objet étudié.

A contrario, il est impossible à l'heure actuelle de prouver les propriétés d'un SMA : on ne peut que constater un résultat en faisant tourner une simulation. Pour autant, rien ne garantit que les sorties de la simulation découlent uniquement des mécanismes que l'on pense avoir élaborés dans un modèle. Or, si cet inconvénient est indépendant de la question de la comparaison à des données, il reste néanmoins très préoccupant.

Par conséquent, la validation se résume à deux démarches distinctes : l'une cherche à démontrer les propriétés intrinsèques d'un modèle, quand l'autre teste son adéquation à des données empiriques.

De plus, si la validation d'un modèle paraît relative, elle ne doit surtout pas être dissociée de l'usage que l'on souhaite en faire. En ce sens, conclure à sa validité autorise-t-il sur la base de ce seul modèle à prendre des décisions qui peuvent avoir des conséquences importantes ? Cet hypothétique modèle validé, donc "parfait", peut-il porter en lui une vérité à laquelle se vouer sans défiance ?

Pour la majorité des scientifiques, la portée des modèles est limitée et il n'existe pas de validation parfaite, encore moins définitive. Cependant, un public moins averti pourrait ne pas prendre les mêmes précautions face à des résultats produits par un modèle annoncé comme scientifiquement valide. Il faut donc commencer par s'interroger sur la signification même de la validation des modèles en général et les présupposés qu'elle laisse entendre. Dans ce travail, nous aborderons différents critères mobilisables selon plusieurs aspects, allant de la conception à l'usage du modèle, pour *évaluer*, plutôt que valider un modèle. Une discussion à propos de l'évaluation des connaissances sera abordée d'un point de vue épistémologique.

1.1.2 La fiabilité des modèles multi-agents

Si la question de la validation touche en définitive l'ensemble des modèles, qu'ils soient multi-agents ou mathématiques, la fiabilité des résultats qu'ils énoncent reste un problème qui concerne plus spécifiquement les SMA. Par fiabilité, il faut entendre l'assurance que les sorties des simulations découlent uniquement des mécanismes que l'on pense avoir élaborés dans le modèle. Car nombreuses sont les possibilités de faire apparaître des artefacts liés à des erreurs de programmation ou de calcul, à une gestion approximative du temps de la simulation et des interactions entre agents, ou à tout autre comportement erratique du simulateur sans lien avec le modèle conceptuel qu'il est censé exprimer. Divers petits défauts ou approximations peuvent être, par amplification, la source d'erreurs plus importantes qui risquent d'influencer fortement le comportement global du système.

On risque ainsi d'attribuer des propriétés à un modèle alors que les sorties d'une simulation peuvent provenir de biais du simulateur, ce que [Michel, 2004] nomme le phénomène de « divergence implémentatoire ». En d'autres termes, le discours que l'on élabore à partir de résultats de simulations peut s'avérer tout à fait déconnecté du modèle que l'on a conçu. Hormis ce travers, le problème principal vient du fait que peu d'utilisateurs en ont conscience. D'autres pourtant, en dénoncent déjà les dangers. Quelques uns rejettent alors toutes expériences à base de SMA en déplorant le manque de formalisme et de fiabilité.

C'est la raison pour laquelle une part importante de la thèse est dédiée à la gestion du temps dans les simulations multi-agents ainsi qu'à l'autonomie et à la protection des données internes aux agents. Car c'est bien au niveau de ces points hyper-sensibles que des biais peuvent plus facilement apparaître. En effet, la façon de modéliser le temps et de traiter la simultanéité des actions et des interactions peuvent influencer considérablement les résultats des simulations. Leur traitement nécessite donc une attention particulière.

Pour aborder ces points particuliers, certains proposent des solutions informatiques (calcul distribué, multithreading, etc.) ou de nouveaux formalismes (ParallelDEVS, MIC*, etc.). Mais les solutions proposées sont souvent très sophistiquées et difficilement applicables par des non-experts. Peut-être que les outils de demain permettront de résoudre certains de ces biais. Toutefois, la technique informatique, seule, apporte rarement une réponse satisfaisante. Au contraire, la prise de conscience de ces problèmes par le modélisateur s'avère primordiale. D'ailleurs, si aucune solution clé en main n'existe, c'est plutôt que la gestion des interactions fait justement partie intégrante du modèle. Le concepteur doit alors la prendre en charge totalement, la spécifier et la justifier. En connaissant les zones sensibles susceptibles d'influencer le modèle, il peut plus facilement anticiper l'apparition d'artefacts et utiliser des procédures standards en les adaptant au domaine qu'il modélise. Étant donné qu'il existe plusieurs manières d'interagir, les agents doivent refléter les modes opératoires qu'ils sont censés reproduire. Pour résumer, la manière dont les agents sont activés ainsi que leurs façons d'interagir, ne doivent pas être dictées par la technique informatique mais doivent, au contraire, être décidées par le concepteur car elles font partie intégrante du modèle.

Par conséquent, une des clés de la fiabilité repose sur l'assurance que le modélisateur maîtrise tous les tenants et les aboutissants du modèle qu'il a conçu. Parce qu'il contrôle complètement son système, il doit être capable d'expliquer tous les résultats produits par le simulateur. En complément de ces démarches, des analyses détaillées et exploratoires permettent de vérifier la fiabilité du simulateur.

1.1.3 La réplique et la lisibilité des modèles multi-agents

Dans le processus d'évaluation, le manque de fiabilité n'est pas le seul défaut que l'on peut reprocher aux SMA. En effet, la difficulté à répliquer indépendamment un simulateur et à

retrouver des résultats qui ont été publiés, est un autre aspect de la modélisation multi-agent qui reste problématique. Pourtant, la réplication complète d'un SMA menée de manière autonome par d'autres personnes, s'avère être un moyen efficace pour vérifier les résultats énoncés et pour garantir la fiabilité du simulateur. D'ailleurs, vérifier et reproduire une expérimentation, qu'elle soit matérielle ou virtuelle, apparaît comme la règle de toute démarche scientifique rigoureuse.

Cette difficulté à reproduire un simulateur est évidemment à rattacher au manque de lisibilité des modèles multi-agents. Une description claire et non ambiguë est une nécessité minimale pour expliquer et transmettre un discours. Or, à l'heure actuelle, les modèles multi-agents présentés ou publiés remplissent rarement ces pré-requis. Certes, on accède parfois aux sources du programme informatique. Mais ce code, que d'ailleurs personne ne lit, n'offre pas une vision synthétique et claire du modèle. On peut le copier pour l'exécuter sur une autre machine (lorsque c'est possible), pour rejouer des simulations. Mais cela ne constitue pas une réplication du simulateur. Répliquer consiste au contraire à réécrire un code informatique à partir de spécifications. La pauvreté de celles-ci ou à l'opposé leurs trop grandes technicités n'apportent pas une description claire et compréhensible par tous. Reproduire alors les résultats énoncés relève de la gageure.

Par ailleurs, sans même viser la réplication, la connaissance véhiculée par un modèle doit être communicable pour être partagée avec la communauté scientifique mais aussi avec les acteurs concernés par le système étudié. Le modèle doit ainsi être lisible, c'est à dire suffisamment explicite pour pouvoir être compris, discuté et critiqué par tout un chacun. Car la critique est un des meilleurs moyens pour remettre en cause les connaissances. Or, si la structure et les mécanismes d'un modèle sont obscurs, on ne peut faire confiance en ses résultats que sur la foi que l'on porte au modélisateur. Brouiller cette connaissance derrière des concepts trop vagues favorise une interprétation exagérée des compétences du modèle. De même, dissimuler cette connaissance derrière un jargon technique peut laisser croire à des capacités formidables qui n'y sont pas (l'héritage des sciences cognitives contribue d'ailleurs à renforcer l'image d'outil hors du commun).

Ainsi, afin de favoriser la remise en question par la critique, mais également pour s'interdire toute tentative de manipulation, un travail important doit être mené après la mise en place d'un simulateur, pour formaliser et décrire au mieux le modèle. Certes, la parfaite explicitation du modèle reste un idéal, mais pour clarifier son propos et en lever les ambiguïtés, le modélisateur doit repenser son modèle afin de le présenter à l'aide de diagrammes réorganisés qui mettent la lumière sur ses aspects les plus importants.

A partir de ces constats, la modélisation multi-agent, si elle veut perdurer, doit proposer des méthodes pour aider à la conception de modèles plus fiables et mieux présentés. C'est grâce à la mise en place de ces méthodes que l'on pourra résoudre en partie les problèmes liés à la validation des modèles.

L'approche méthodologique que je présenterai, s'oriente autour des expériences que j'ai acquises au Cirad¹ sur la gestion des ressources renouvelables, en tant que modélisateur impliqué dans des projets de développement mais aussi comme enseignant². En effet, si les SMA peuvent être

¹ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement. www.cirad.fr

² Dans le cadre de la diffusion des connaissances et suite à de nombreuses demandes, l'UR GREEN a mis en place une formation intitulée "Simulation de Systèmes Complexes : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables". Cette formation de deux semaines a été dispensée en France et dans de nombreux pays (cf. <http://cormas.cirad.fr/fr/formati/passe.htm>). Elle est destinée à des non-informaticiens désirant s'initier à la modélisation. Le cours dresse un panorama des différents outils de modélisation. Il présente également l'approche objet et la formalisation UML. Des exemples d'applications multi-agents sont exposés ainsi que leur utilisation pour la gestion des ressources renouvelables. Des travaux pratiques sont menés en groupe permettant de suivre un processus complet de modélisation multi-agent, depuis la conception participative du modèle jusqu'à son implémentation sur la plate-forme CORMAS (voir à la fin de ce chapitre).

appliqués à un grand nombre de domaines, leur utilisation dans le cadre de l'aide au développement en agronomie nécessite une démarche particulière : une posture de recherche-action qui place l'acteur au centre des préoccupations. Quelques précisions sur ces notions apparaissent nécessaires.

1.2 LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES

1.2.1 La gestion des ressources renouvelables nécessite une approche transdisciplinaire

Les ressources naturelles renouvelables désignent des ressources naturelles qui, contrairement au pétrole par exemple, voient leurs quantités évoluer selon un processus de régénération naturelle : eau douce d'un lac alimenté par les précipitations et le ruissellement, croissance et dissémination d'espèces végétales et animales (biomasse, biodiversité), etc. Sans intervention humaine, leur état évolue au cours du temps selon des dynamiques plus ou moins complexes, souvent en interrelation faisant intervenir des processus biophysiques (évaporation, pollinisation, migration...).

Lorsqu'on aborde la gestion de ces ressources, il faut alors prendre en compte les activités humaines qui influencent leurs dynamiques. D'ailleurs, avec la perspective du développement économique, la terminologie est modifiée et ces ressources prennent alors le nom de stocks. Ainsi, la disponibilité et l'état de ces stocks évoluent aussi en fonction des prélèvements directs : pompage, récolte, chasse, élevage... Mais leurs dynamiques sont également affectées par d'autres activités ayant des impacts plus ou moins indirects sur l'état de ces ressources : pollution, érosion, épidémie, etc... En économie, ces effets indirects sont appelés les externalités (par exemple, une production occasionnée par un agent peut en affecter d'autres).

Aussi, une gestion *durable* sous-entend des usages régulés pour la préservation de ces ressources tant en quantité qu'en qualité. On comprend bien alors que la problématique de la gestion des ressources renouvelables nécessite de considérer ces systèmes comme des anthropo-socio-écosystèmes, ouverts, interconnectés et hautement complexes. La figure suivante résume l'interdépendance de ces différentes dynamiques.

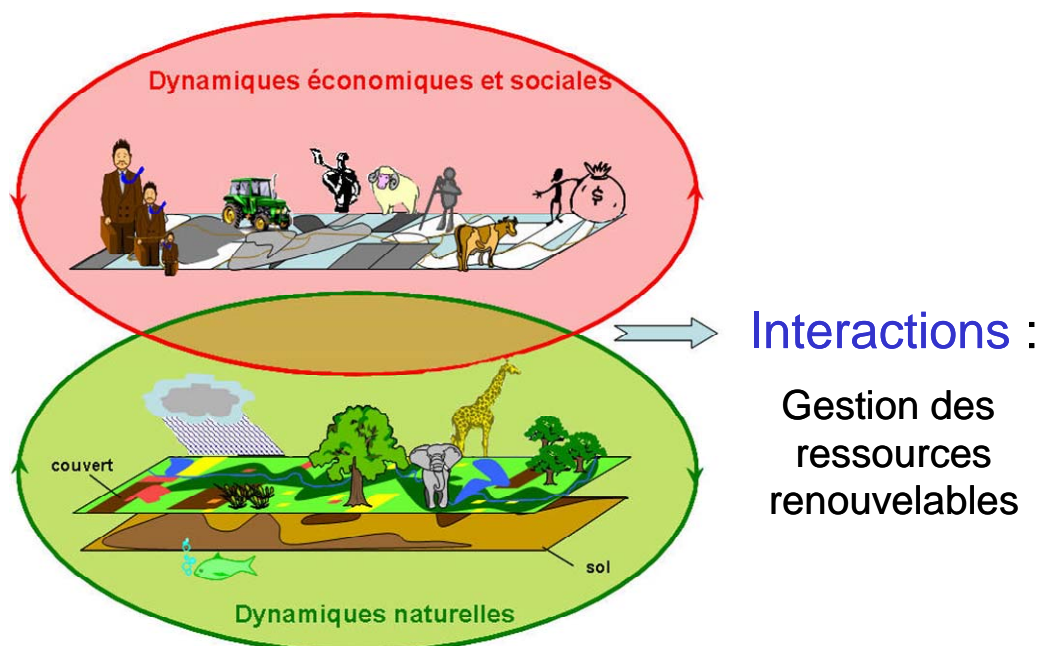


Figure 1 : Dynamiques des ressources naturelles renouvelables en interaction avec des dynamiques sociales. Pour ces systèmes complexes, on observe d'une part des dynamiques naturelles à l'échelle d'un organisme, d'une population ou de peuplements, et d'autre part, des dynamiques sociales à l'échelle des individus ou des organisations.

Aider à la gestion durable nécessite donc des compétences scientifiques variées qui doivent s'articuler dans un dialogue transdisciplinaire. Il s'avère alors que la modélisation multi-agent peut jouer un rôle particulièrement intéressant pour favoriser ce dialogue et pour aider à comprendre les points de vue de chacun.

1.2.2 Le développement durable

Gérer des ressources renouvelables a pour objectif de maintenir l'état de ces ressources dans le temps. Cette problématique s'inscrit donc dans le cadre plus large du développement durable.

Le terme "développement durable" ou "soutenable" désigne :

"un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs".

Il a été officialisé en 1987 suite au rapport de Mme Brundtland, présidente de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Mais c'est à partir de la conférence de Rio en 1992 qu'il a été reconnu et popularisé. Cette reconnaissance démontre une sensibilisation mondiale aux enjeux environnementaux. Mais elle prend également en compte les enjeux économiques et sociaux. Ainsi, les textes constitutifs au développement soutenable se fondent sur trois grands principes :

- la préservation de l'environnement,
- la viabilité économique et
- l'équité sociale.

Ils préconisent aussi une participation des populations aux décisions. Car si la nécessité de réfléchir et d'agir de manière plus globale paraît maintenant évidente (à l'exemple du réchauffement climatique), la sensibilisation des acteurs locaux vis-à-vis de leurs pratiques (exemple de la culture sur brûlis en Amazonie) nécessite de leur part un investissement ainsi que la prise en considération de leur point de vue. Sous cet angle, le bilan de cette prise de conscience semble donc positif, même si la mise en œuvre du développement soutenable ne suit pas toujours...

Cependant, plusieurs critiques se font entendre. Certains discutent de la terminologie employée, celle du développement. Alors même qu'il s'agit de prendre mieux en compte les données environnementales et sociales, le concept de développement peut être associé à une conception essentiellement économique et technique du monde. Pour [Rist, 1996], le développement et la protection de l'environnement sont incompatibles et associer ces termes relèverait même de l'imposture. De plus, le "caractère ethnocentrique du développement et la conception linéaire et évolutionniste de l'histoire qu'il véhicule, au moins implicitement, n'en font pas nécessairement un modèle pour le reste du monde" [Roggero & Vautier, 2003]. D'ailleurs, le modèle économique de croissance avait déjà été remis en cause dès 1972 suite au rapport du club de Rome ("Halte à la croissance ? Rapports sur les limites de la croissance") rédigé sous la direction de [Meadows et al., 1972] qui montrent (à partir des résultats du modèle DYNAMO de Jay Forrester) que, sans changement des modes de consommation et de production, les ressources de la planète s'épuiseraient d'ici la fin du 21ème siècle. La croissance économique serait alors le facteur principal de l'aggravation des dérèglements écologiques de la planète (réchauffement climatique, pollution, pénuries de matières premières, destruction des écosystèmes).

Une autre critique vis-à-vis du développement durable émane des pays en développement, qui considèrent parfois ce concept comme un luxe des pays riches, voire comme une ingérence écologique ou, pire encore, comme une idéologie qui s'attacherait plus à la protection de la nature qu'à celle des humains. Par conséquent, aborder la gestion des ressources et le développement durable avec des acteurs de pays en développement nécessite une approche plus humble qui oblige à une remise en cause de quelques certitudes.

1.2.3 Une posture originale pour appuyer le développement durable

Les trois grands principes du développement durable impliquent de mettre en œuvre des approches pluridisciplinaires. De même, les remarques précédentes vis-à-vis de la terminologie et des présupposés impliquent une remise en cause des pratiques de la recherche pour le développement. Il est nécessaire de reconnaître la complexité des situations rencontrées pour les aborder. En conséquence, cela oblige à des changements de posture vis-à-vis de l'expertise et de l'aide à la décision.

Car la gestion durable des ressources renouvelables requiert de prendre en considération le point de vue de chacun, scientifiques et acteurs locaux du développement pour proposer des innovations techniques mais aussi pour favoriser des changements des pratiques pour une gestion plus durable. Dans ce domaine, une des qualités indispensables du modélisateur est l'écoute et la compréhension des enjeux de chacun, au-delà même de ses propres convictions.

Un exemple : en regardant la photo ci-dessous, ne croirait-on pas voir une image bucolique et apaisante d'une petite maison dans la prairie, un endroit fantasmé "qui sent la noisette", où la vie est en harmonie avec la nature.



Figure 2 : Photo d'une petite exploitation à Uruará.

Maintenant, si nous apprenons que cette photo a été prise à Uruará, au cœur de la forêt amazonienne, alors un autre sentiment risque de nous venir. Le battage médiatique pour la sauvegarde de la plus grande forêt du monde alimente certains préjugés et pousse nos sentiments écologistes à imaginer des solutions simplistes et parfois radicales. Mais, de la même manière, les habitants d'Uruará considèrent encore la forêt comme une simple réserve qu'il faut nettoyer pour y implanter un "pâturage considéré comme « propre » et productif, bref sans arbre" [Bonaudo, 2005]. La situation est donc bien plus complexe dès lors que l'on prend en compte les enjeux économiques et politiques de ces situations, et surtout dès que l'on considère les familles qui y vivent ou survivent dans des conditions souvent difficiles.

Sans modification des représentations de chacun, le changement est difficile et souvent brutal. En complément de propositions d'experts, le développement durable nécessite également une posture plus mesurée vis-à-vis de l'aide à la décision. Dans ce contexte, la démarche de modélisation implique des facultés d'écoute et de remise en cause.

1.2.4 Intégrer les connaissances pour accompagner la décision

La démarche ComMod (Companion Modeling) présentée succinctement au 3.6, cherche à aborder d'une manière originale les problèmes de partage et d'accès aux ressources. A partir de ces questions de développement, elle s'intéresse aux dynamiques sociales et plus particulièrement aux processus collectifs de décision qui émergent des interactions entre des acteurs ayant des perceptions différentes voire opposées et des poids différents. En privilégiant la modélisation multi-agent, ComMod s'appuie sur des approches par scénarios en impliquant fortement les acteurs dans la conception et l'exploration de ces scénarios, mais aussi dans l'élaboration d'indicateurs co-construits.

Mais surtout, elle ne restreint pas les parties prenantes (stakeholder) aux seuls preneurs de décision. Elle engage aussi les acteurs plus anonymes qui participent néanmoins aux processus du développement. Car dans le domaine des ressources renouvelables qui engage la responsabilité de chacun, la décision dépend rarement d'une seule personne. Elle nécessite au contraire que tous ceux qui influent par leur comportement sur la dynamique globale, prennent part activement à la décision. Car il s'avère qu'une meilleure compréhension du contexte et un meilleur partage des enjeux ainsi que l'appropriation d'une décision améliorent le processus même de la décision et conduisent à un meilleur engagement des acteurs qui prennent conscience du rôle de chacun et donc d'eux-mêmes.

Ainsi, les SMA permettent d'intégrer des connaissances variées qui s'articulent pour illustrer une situation concrète. L'intégration se décline en :

- Intégration des savoirs scientifiques multidisciplinaires, des sciences biophysique pour comprendre les dynamiques des ressources naturelles, aux sciences humaines et sociales pour comprendre les pratiques d'acteurs, leur coordination, leurs dynamiques économiques, politiques et sociales ;
- Intégration des savoirs locaux et des pratiques qui conditionnent les stratégies d'acteurs ;
- Intégration des objectifs d'acteurs ayant des intérêts diversifiés, voire contradictoires.

De ce fait, pour aborder la gestion intégrée, il est nécessaire de mettre les acteurs au centre des préoccupations de recherche. En effet, les ressources renouvelables peuvent s'étudier à différents niveaux. Dans le cas de l'élevage par exemple, certains analysent la physiologie de la plante ou son assimilation par le ruminant. D'autres étudient les rendements productifs au niveau de la parcelle. A une autre échelle plus globale encore, on représente l'organisation et les flux au sein de la filière bovine pour imaginer son évolution et celle du marché. Mais de façon étonnante, le niveau de l'acteur, de sa famille ou de son exploitation est rarement pris en compte dans l'étude de ces systèmes. Pourtant identifier les pratiques et comprendre les motivations des producteurs paraissent essentiel pour appuyer la gestion durable.

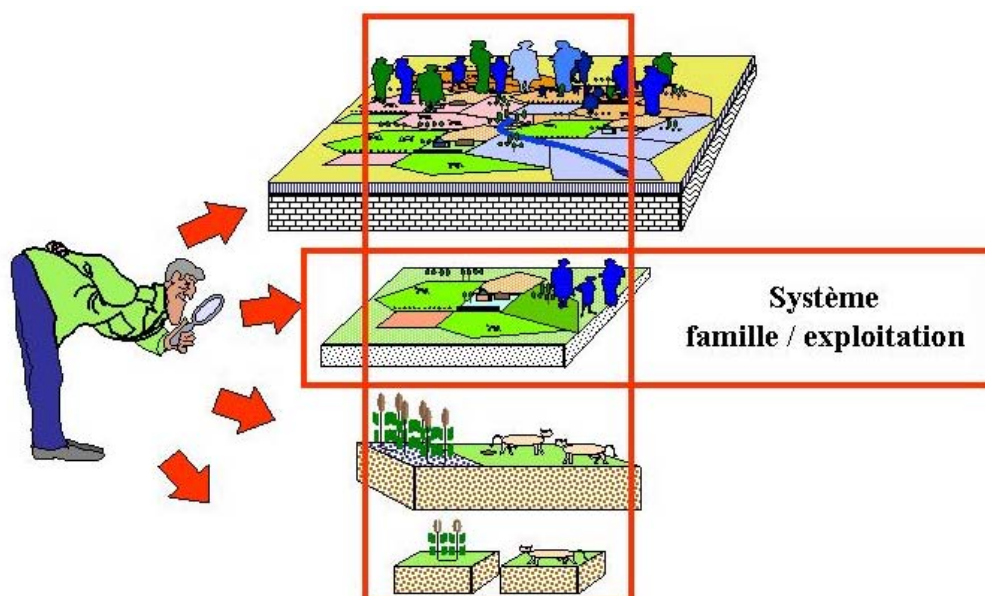


Figure 3 : Les différents niveaux d'étude pour aborder l'étude des systèmes de production, d'après [Rossi & Courdin, 2006].

Ainsi, si le maître mot est intégration, l'approche ComMod remet l'acteur au centre des préoccupations du développement durable. Dans ce contexte, la modélisation multi-agent peut être perçue comme un outil de médiation qui autorise un recul face à des situations souvent tendues et parfois conflictuelles.

1.3 OBJECTIF DE LA THESE

En partant de l'hypothèse que le défaut de validation, ou plus justement que les problèmes d'évaluation reprochés aux SMA, sont le plus souvent à attribuer à une insuffisance de fiabilité, à la pauvreté de leur description et à la difficulté à les répliquer, cette thèse a pour objectif de définir un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents appliqués à la gestion des ressources renouvelables. Il ne s'agit pas de décrire une méthodologie complète qui guiderait un apprenti modélisateur, de *a* à *z*, à concevoir et utiliser des SMA, mais bien d'un cadre pour en tracer les grands principes et les limites. J'essaierai ainsi d'apporter des éléments afin d'identifier ces faiblesses pour les traiter de façon appropriée. Même si ce cadre peut s'appliquer à d'autres domaines, je l'ai restreint ici à la seule modélisation des ressources renouvelables dont je maîtrise davantage les techniques.

Dans ce contexte, je défendrai tout au long de cette thèse l'idée d'une modélisation exposée, c'est-à-dire d'une modélisation qui doit assumer ses choix sans imposer ses points de vue. Il faut abandonner la vision naïve de la modélisation qui consisterait à penser qu'un modèle est objectif. En effet, la notion de modèle neutre qui ne serait qu'une copie du réel *in silico*, impliquerait que le modélisateur n'a aucun présupposé sur le système qu'il étudie et que le monde se reflète dans sa pensée comme une image dans un miroir. Or, il n'en est rien. Que ce soit fait d'une manière intentionnelle ou, comme c'est souvent le cas, de manière involontaire, un modèle est forcément une représentation subjective du monde. Il est donc essentiel d'explicitier ses choix et de les présenter de la façon la plus lisible possible pour qu'ils puissent être compris, partagés ou critiqués.

En défendant l'idée que la modélisation multi-agent pour la gestion des ressources renouvelables est une véritable discipline et non pas juste une spécialité informatique, j'exposerai mes points de vue sur les différentes démarches de modélisation, sur la validation des modèles, la fiabilité des simulateurs et la nécessité d'une représentation claire et compréhensible par tous.

En m'appuyant sur certains concepts épistémologiques qui dépassent largement le cadre de cette thèse, j'essaierai néanmoins d'aborder le problème de l'évaluation des connaissances et j'expliquerai pourquoi il est préférable d'éviter d'employer le terme validation qui véhicule l'idée de certitude.

Par conséquent, suite aux défauts reprochés aux SMA trop souvent sous-estimés, mais aussi à cause d'une certaine approche naïve de la modélisation, il est préférable, dans l'état actuel des SMA, d'opter pour des modèles simples (démarche KISS pour “Keep It Simple Stupid”) plutôt qu'une approche descriptive (KIDS pour “Keep it Descriptive Stupid”) comme le proposent [Edmonds & Moss, 2004]) qui chercherait à introduire dans le modèle le maximum d'informations considérées comme données par nature.

1.4 ORGANISATION DU DOCUMENT

Ce document n'est pas destiné aux seuls informaticiens mais plutôt à un public plus diversifié qui chercherait à mieux maîtriser la pratique de la modélisation multi-agent.

Le manuscrit est divisé en trois parties. La première traite de la modélisation en général, de l'intérêt de concevoir un modèle et de la question de la validation. Elle s'attache aussi à comparer les avantages respectifs des systèmes à équation des systèmes multi-agents. En reconnaissant le rôle particulier des SMA pour faire émerger des propriétés nouvelles, elle montre alors les conséquences que la simulation multi-agent entraîne pour en vérifier les caractéristiques.

La deuxième partie s'intéresse davantage aux aspects techniques qui touchent principalement à la gestion du temps et de l'autonomie des agents. Elle en présente les grands principes et expose des solutions informatiques proposées par différentes recherches pour les prendre en charge. Néanmoins, elle montre comment ces techniques ne sont pas toujours appropriées pour la gestion des interactions dans le cadre de la modélisation des ressources renouvelables. Elle montre alors le rôle essentiel que le modélisateur doit endosser pour estimer par avance les biais susceptibles d'apparaître. Il doit alors proposer des solutions qui rentrent dans le cadre du sujet traité et justifier les choix de gestion qu'il a pris.

La dernière partie présente les travaux qu'il est nécessaire de mener *après* les phases de conception et d'implémentation d'un SMA pour en améliorer la fiabilité et la lisibilité. Elle montre le rôle essentiel qu'apporte une exploration poussée d'un modèle pour en vérifier le fonctionnement mais aussi pour découvrir des propriétés souvent insoupçonnées. En exposant les avantages de la réplication, cette partie aborde la question de la lisibilité des SMA qui sont souvent considérés comme des boîtes noires. Elle confirme alors l'importance des diagrammes comme outil de dialogue entre les disciplines et montre la nécessité de les repenser pour les présenter de façon claire et non-ambiguë. En reprenant la liste des points sensibles, sujets à générer des biais, une discussion précise les avantages et les inconvénients des démarches KISS et KIDS. Les conclusions qui préconisent la conception de modèles simples, reviennent sur la fonction jouée par le modèle dont le rôle est essentiellement d'apprendre et de comprendre. D'ailleurs, au cours du processus de modélisation, on se rend souvent compte que la question initiale s'est progressivement modifiée. Dans le même temps, le modèle a changé d'état en améliorant sa valeur informative.

Si une partie de ce travail repose sur des réflexions d'ordres épistémologiques, il s'appuie également sur des exemples concrets de pratiques de modélisation. Cette thèse est donc conçue sur des expériences appliquées à des situations réelles (TransAmazon, Mobe, ...) mais également sur des cas beaucoup plus théoriques qui prennent appui sur des modèles multi-agents plus abstraits (modèle proie-prédateur, ECEC, Sugarscape, Forpast, ...). Cependant, afin d'en proposer une vision moins abstraite, un dernier chapitre expose un modèle plus concret sur la déforestation en Amazonie. Il permet d'illustrer les principaux concepts développés au cours de cette thèse.

PREMIERE PARTIE :

ROLE, EVALUATION ET USAGES DE LA MODELISATION

MULTI-AGENT POUR L'AIDE A LA GESTION DES

RESSOURCES RENOUVELABLES

Chapitre 1

QUE SIGNIFIE LA VALIDATION D'UN MODELE ?

"L'exactitude n'est pas la vérité"
Henri Matisse

"Le théoricien scientifique n'est pas dans une situation enviable, car la Nature ou, plus précisément, l'expérience, est un juge implacable et peu amical de ses travaux. Elle ne répond jamais « oui » à une théorie. Dans le cas le plus favorable elle dit « peut-être », le plus souvent, et de loin, elle dit simplement « non » [...]. Le verdict fatal est probablement la destinée de toutes les théories et il tombe, pour la plupart d'entre elles, peu de temps après leur conception".
Albert Einstein

Comme il a été dit en introduction de cette thèse, une critique récurrente faite aux modèles multi-agents porte sur la difficulté voire l'impossibilité de leur validation. A la question incessante qui inquiète le modélisateur sur la validité de son travail, il semble nécessaire de réfléchir sur la portée de cette question et les présupposés qu'elle véhicule. Car la meilleure réponse à cette question consiste dans un premier temps à retourner la question : quels sont les critères qui permettraient d'affirmer qu'un modèle multi-agent est validé ?

D'ailleurs, pourquoi cette difficulté serait-elle le "privilège" des SMA ? La question de la validation ne se pose-t-elle pas aux autres catégories de modèles ? C'est la raison pour laquelle ce chapitre essaie de répondre à ces questions en les étendant à tous les types de modèles pris dans un sens large.

1.1 DEFINITIONS DE VALIDATION ET SES SOUS-ENTENDUS

Quelle soit prise dans un cadre classique ou dans celui des SMA, il est généralement admis que la validation consiste à confronter des mesures opérées dans le système observé avec des résultats issus du modèle [Lewis, 1993], [Bart, 1995], [Bousquet, 1995], [Rykiel, 1996], [Balci, 1998], [Millischer, 2000],... D'ailleurs, la citation suivante exprime bien la notion de validation qui est communément admise :

Validation is the determination that the conceptual model is an accurate representation of the real system. Can the model be substituted for the real system for the purposes of experimentation? If there is an existing system, call it the base system, then an ideal way to validate the model is to compare its output to that of the base system. [Banks, 1999]

Ainsi, à partir du moment où ses résultats sont correctement corrélés à des données empiriques, un modèle serait considéré comme valide. On peut d'ailleurs remarquer qu'un SMA génère des données de simulation au même titre qu'un modèle dynamique en mathématique. Il peut alors répondre également à ce critère de validation. Mais revenons sur cette définition, car si l'on souscrit à ce critère de validation, qu'apporte alors au modèle ce statut de validité ? En effet, il me paraît important de prendre la question dans l'autre sens : ne pas se demander seulement comment valider un modèle, mais plutôt s'interroger sur l'intérêt que procure la déclaration de validité. Car à mes yeux, le problème réside dans la déclaration même de validation. Dans la citation précédente, il est suggéré qu'à partir du moment où ses sorties sont correctement corrélées à des données, ce modèle dit validé serait une représentation juste d'un système réel (*accurate* en anglais signifie

exact, fidèle, juste). Or, cette vision classique de la validation qui est largement partagée, demeure problématique car elle véhicule une idée inquiétante : l'idée de vérité, d'une connaissance (contenue dans le modèle) sans faille, affirmant une explication juste du monde. La déclaration de validité n'empêcherait alors plus aucune précaution et l'on pourrait substituer le modèle à la réalité et prendre des décisions importantes en se reposant sur la certitude de ses résultats. Car le terme validation renvoie à valide dont une des définitions du Larousse est "Proposition valide : énoncé qui est vrai en vertu de sa seule forme". Certes, la validation a aussi des significations moins extrêmes (valider une élection), dans le sens "qui est valable", c'est-à-dire "qui a un fondement accepté et reconnu, qui est vraisemblable"³.

La validation sous-entend donc deux significations distinctes : la vérité et la vraisemblance. De la première signification que je nomme "validation forte", découle la certitude qui est une notion dangereuse surtout si on l'applique aux systèmes sociaux et environnementaux. A l'opposé, la vraisemblance souligne un caractère bien plus nuancé (likelihood en anglais est encore plus joli et subtil) : la connaissance ou l'explication semble juste mais il faut cependant essayer de la faire admettre. Dans ce sens, la validation que je nomme "validation faible", n'est plus une certitude absolue mais permet de considérer les conclusions comme recevables. Néanmoins, la tentation est grande de considérer qu'à partir du moment où un modèle est déclaré comme valide, la connaissance qu'il véhicule est vraie.

D'autre part, la confrontation de ses résultats avec "le système réel" comme il est trop souvent énoncé, pose aussi problème. Comme on le verra au cours du chapitre 2, la notion de réel est un concept délicat. Il est vrai que beaucoup d'auteurs ([Edmonds, 2000a], [Thom, 1978]) avertissent que l'interprétation des résultats de simulations ne doit pas se faire en fonction de l'objet réel X, mais bien en fonction de son abstraction (l'analogie de X, voir graphique 2-7 page 54) :

The most common error in this sort of modelling is that modellers conflate the abstraction and the target in their minds and attempt to interpret the results of their MAS model directly in terms of the target system. [Edmonds, 2000a]

Par conséquent, sur la base de ces définitions et sur les présupposés que laissent entendre la validation (forte), il est nécessaire pour la suite de ce chapitre de comprendre ce que signifie l'ajustement correcte à des données mais aussi de savoir comment prouver la véracité d'explications scientifiques.

1.2 QUE PROUVE UN BON AJUSTEMENT A DES DONNEES ?

Dans l'esprit de nombreux scientifiques, il est fréquemment admis qu'un modèle est validé lorsque ses valeurs de sortie sont proches des données observées. Assurément, comparer les sorties d'un modèle avec des données empiriques est une démarche importante qui constitue une étape souvent indispensable du processus de modélisation. Mais est-ce suffisant pour conclure à la validité d'un modèle ? Si, par exemple, les fluctuations des prix des chaussures apparaissent corrélées aux rythmes des tempêtes de Neptune, il semble délicat d'affirmer que cette lointaine planète influence le marché de la chaussure ! Cette remarque peut sembler caricaturale et risible. Il n'empêche que l'on s'est déjà sérieusement posé de telles questions sur un sujet assez similaire : l'évolution de la densité des tâches solaires montre une série temporelle qui se trouve bien corrélée avec une autre série des captures de Lynx issues des registres de la compagnie de la baie d'Hudson au Canada.

³ Définition du Trésor de la Langue Française Informatisé : <http://atilf.atilf.fr/>

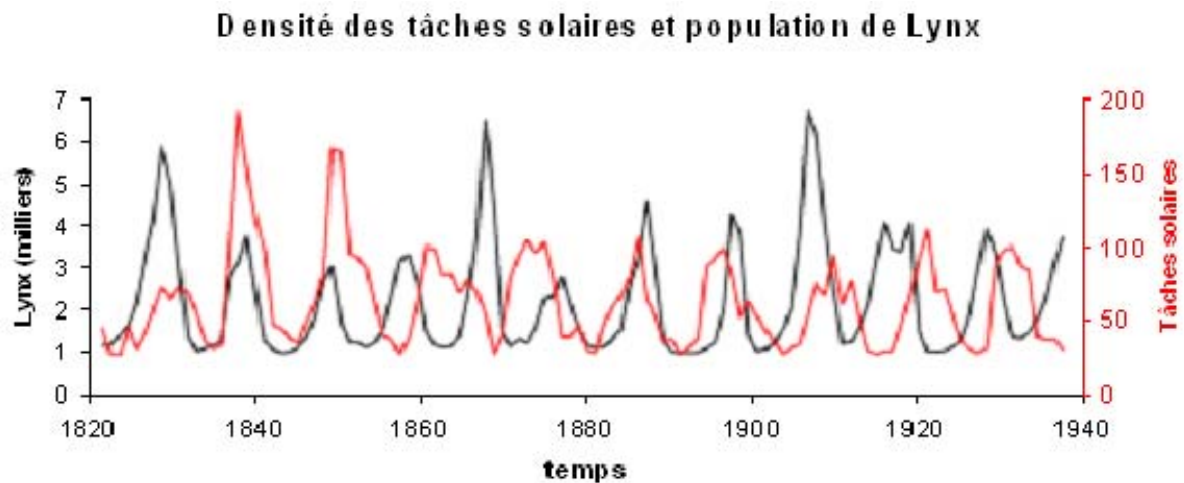


Figure 1-1 : Corrélation apparente entre l'évolution de la densité des tâches solaires et des captures de Lynx issues des registres de la compagnie de la baie d'Hudson au Canada, d'après le cours de J. R. Lobry [2008]. Cette coïncidence curieuse avait été remarquée par Elton dès 1924.

Dans le même ordre d'idées, le modèle des astres conçu par Ptolémée, qui décrit les trajectoires des planètes gravitant autour de la Terre, constitue un autre exemple de bonne corrélation entre des mesures et un modèle erroné.

Ainsi, un modèle peut exhiber des résultats cohérents avec des données empiriques alors même que son contenu est clairement éloigné des dynamiques qu'il est supposé représenter.

Toujours à partir de ces données sur les lynx et les lièvres d'Amérique (établie d'après le nombre de peaux vendues chaque année dans les comptoirs du Canada), Odum a tracé le graphique suivant :

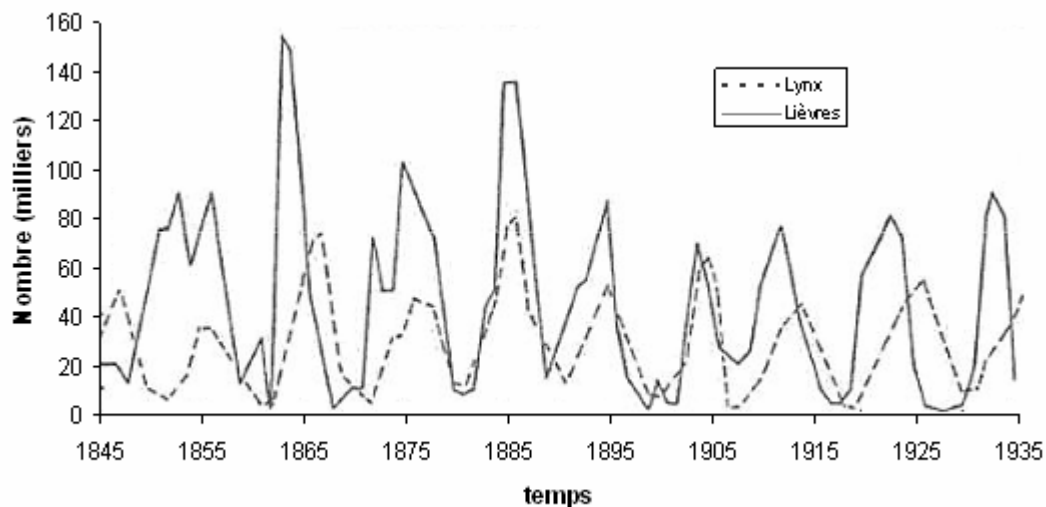


Figure 1-2 : Le graphique d'Odum [Odum, 1971], dessiné à partir des données de MacLulich, 1937.

Les évolutions des effectifs des deux populations sont donc bien corrélées. Elles présentent des oscillations qui ne semblent pas dues aux rythmes des saisons mais plutôt aux interactions entre proies et prédateurs. Suite à des comparaisons avec d'autres données de population en interaction de prédation, on a cherché une explication par un modèle générique. A l'issue de la première guerre mondiale et à partir des données expérimentales d'Umberto D'Ancona (captures de pêche en Adriatique), Vito Volterra propose alors un modèle proie-prédateur encore fameux aujourd'hui [Volterra, 1926]. Ce modèle, présenté en annexe 1 (p. 288), montre des courbes de populations de proies et de prédateurs oscillantes dont les cycles sont légèrement décalés dans le temps. Le modèle de Volterra, une fois paramétré, montre que ses résultats sont assez bien corrélés à ces données de pêches (sardines – sélaciens) ou à celles des captures de lièvres et de lynx. Néanmoins,

les deux séries périodiques observées sur le graphe ci-dessus ne sont pas déphasées comme le voudrait le modèle⁴.

En ce qui concerne les données de capture de lynx et de lièvres, il a été constaté plus tard que cette série de données reflétait plutôt les cycles du marché américain des fourrures : la demande fluctuante pour les fourrures de lynx influait fortement les captures [Lobry, 2007].

Par conséquent, les résultats d'un modèle peuvent apparaître cohérents avec des données empiriques alors même que celles-ci sont inhérentes à un facteur externe non pris en compte par le modèle.

1.3 LA QUESTION DE LA PREUVE ET DE LA VERITE

Comme il a été souligné au début de ce chapitre, le terme de validation laisse sous-entendre l'affirmation d'une certaine vérité. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre la signification de la preuve scientifique ainsi que la notion de vérité.

1.3.1 La vérité du rat superstitieux

La superstition est communément considérée comme une manifestation exclusivement humaine par laquelle nous espérons établir un ordre dans l'incertitude du monde qui nous entoure. Mais un comportement superstitieux peut également être produit par des animaux, comme le rat de laboratoire. Ainsi, dans "la réalité de la réalité", Paul Watzlawick, considéré comme le chef de file de l'École de Palo-Alto, relate une telle expérience amusante et intéressante [Watzlawick, 1978, p.55].

Cette expérience du "rat superstitieux" consiste à libérer un rat de sa cage qui repose à l'extrémité d'une planche. A l'opposée de celle-ci se trouve un plateau pour aliments. Dix secondes après la libération du rat, des aliments sont lâchés dans le plateau. En très peu de temps l'esprit pratique du rat associe sa libération à l'approvisionnement en nourriture. Mais si le rat arrive au plateau en moins de dix secondes après sa libération, aucun aliment n'est déposé. Or, il ne lui faut que deux secondes pour aller de sa cage au bout de la planche. Contrairement à son inclination normale de se diriger directement vers le plateau, il lui faut donc attendre pour laisser les dix secondes s'écouler. Dans ces circonstances, le retard acquiert une signification inhabituelle. Quelle que soit l'activité du rat pendant ces huit secondes, elle devient à ses yeux, l'action nécessaire qui produit ou qui est récompensée par la délivrance de nourriture. Chaque rat adopte alors une attitude différente, celle qui lui semble être la meilleure pour ralentir sa démarche afin d'obtenir la nourriture. Certains se déplacent comme une écrevisse, d'autres font des pirouettes à droite ou à gauche, d'autres encore des petits sauts que le rat peut avoir faits par pur hasard au début. Mais fidèlement, ces gestes sont répétés autant de fois que l'expérience est recommencée. A chaque fois

⁴ A ce sujet, [Israel, 1996] rapporte une lettre qu'Umberto D'Ancona écrivit à Vito Volterra en 1935 :

Je serai bien heureux si l'on pouvait donner des démonstrations expérimentales précises de vos théories mathématiques. [...] Malheureusement, mes observations statistiques peuvent être aussi interprétées dans un autre sens et Pearson, Bodenheimer et Gause sont de cet avis. Voilà pourquoi moi aussi je dois admettre que ces critiques ont un fondement sérieux.

Bien que les sélaciens soient des prédateurs des sardines et malgré la bonne corrélation des sorties du modèle (qu'à l'époque on nommait théorie) avec les données relevées, D'Ancona considère que le modèle n'est pas corroboré par les données statistiques. Toutefois, il ne rejette pas le modèle de Volterra malgré l'absence de corroboration :

Votre théorie n'est pas le moins du monde touchée par toute cette question.[...] il vaut mieux pour vous ne pas lier votre théorie à une base expérimentale qui est sans doute moins solide que la théorie elle-même.

La prudence que D'Ancona montre à l'égard du modèle de Volterra prouve son profond respect pour les outils mathématiques et les théories. L'absence de corroboration ne lui permet pas de rejeter le modèle.

que le rat trouve des aliments sur le plateau, cela confirme sa conviction que cette conduite particulière est à l'origine de la délivrance de nourriture.

Ces conduites sont l'équivalent évident de superstitions humaines compulsives souvent fondées sur la conviction vague qu'elles sont exigées par un "expérimentateur divin". "Selon un mode de comportement humain caractéristique, le rat préférera à l'incontournabilité des faits, une vision de la réalité conforme à ses convictions" [Watzlawick, 1978]. Des expériences plus sophistiquées menées avec des êtres humains ont montré comment, dans une situation d'incertitude ou d'angoisse, une explication séduisante du réel peut devenir une certitude irréfutable. Une fois enracinées comme l'interprétation d'événements, cette vision de la réalité résiste à toutes objections. Cette résistance aux "changements" [Watzlawick et al., 1975]⁵ est confirmée par d'autres expériences montrant qu'il est très difficile de modifier ces croyances, même si une information vient les contredire. Parfois même, des éléments qui contredisent "l'explication" ne conduisent pas à sa correction, mais au contraire la renforcent. En effet, une situation d'incertitude crée une angoisse et une attente, et nous préférons, pour éviter toute gêne, faire ressembler la réalité à la solution adoptée, plutôt que sacrifier cette dernière. Pour atténuer l'angoisse d'une situation incertaine, la recherche de sens (ou recherche de relations causales) conduit à une nouvelle conception de la réalité (une re-présentation).

Par ailleurs, Watzlawick identifie deux réalités que nous confondons communément :

- La réalité de premier ordre, qui a trait aux "propriétés physiques, objectivement sensibles des choses", est liée à la perception sensorielle que l'on en a, et est une réalité scientifiquement vérifiable.
- La réalité de second ordre se rattache à la signification et à la valeur que l'on attribue à ces choses perçues. Elle se fonde sur la communication. "Conflits interpersonnels, différences de normes culturelles montrent que ces deux réalités sont très différentes. La réalité de second ordre, qui repose sur des règles subjectives et arbitraires, n'est pas renseignée par la réalité de premier ordre" [ibid.].

L'auteur donne un exemple simple : un adulte et un petit enfant voient un feu rouge. Il s'agit bien du même objet, de la même couleur pour tous les deux, mais il signifiera "ne traversez pas" uniquement pour l'adulte.

Watzlawick explique que nous avons tendance à penser que la réalité correspond à la façon dont nous voyons les choses, qu'il existe pour chacun d'entre nous une réalité de second ordre "réelle" et que tout point de vue divergent est pour nous celui d'un "méchant ou d'un fou".

« De toutes les illusions, la plus périlleuse consiste à penser qu'il n'existe qu'une seule réalité. En fait, ce qui existe, ce sont différentes versions de la réalité, dont certaines peuvent être contradictoires, et qui sont toutes l'effet de la communication et non le reflet de vérités objectives et éternelles. [...] De la réalité chacun se fait son idée. Dans les discours scientifiques et politiques, dans les conversations de tous les jours, on s'en réfère toujours en dernière instance à la référence suprême : le réel. Mais où donc est ce réel ? Et surtout, existe-t-il réellement ?! » [Watzlawick, 1978].

Considérant la réalité comme construction mentale, la contribution de l'école de Palo Alto au constructivisme est essentielle (ce concept sera abordé au chapitre suivant). Après avoir montré la fragilité de la notion de vérité, il est maintenant nécessaire de comprendre la signification de la preuve scientifique.

⁵ Dans "Changements", les auteurs expliquent par ailleurs qu'ils se sont "servis de la théorie des groupes comme d'un modèle conceptuel et non pour apporter une preuve mathématique" [ibid.].

1.3.2 *Petit détour du côté de l'épistémologie*

L'épistémologie est une branche de la philosophie qui étudie les principes des sciences et s'attache ainsi à comprendre les mécanismes du savoir. Elle construit son raisonnement sur l'histoire de la science et de ses progrès. Elle aborde entre autre le problème de la preuve et de la vérité scientifique. Dans notre questionnement sur la validation des modèles, on peut utilement aborder cette discipline en effectuant une analogie entre théorie et modèle. Evidemment, je n'ai pas la prétention d'approcher ce domaine en petit philosophe : je n'en ai ni les capacités ni le désir. Cette discipline est si vaste et si riche qu'il me faudrait des années pour en lire les auteurs majeurs. Mais il m'a semblé que quelques rappels, issus de mes lectures basiques, pouvaient utilement nourrir une réflexion sur la validation des modèles.

1.3.2.1 Place du modèle, entre la théorie et l'expérimentation

Un modèle, est-ce déjà une théorie ou simplement une description simplifiée de la réalité ? Selon Alain Pavé, "il ne faut pas non plus confondre modélisation et théorisation : on peut théoriser sans modéliser, on peut modéliser sans théoriser. En revanche le modèle est un outil précieux pour toute démarche théorique..." [Pavé, 1994]. Toutefois la séparation entre ces deux notions n'est pas toujours évidente.

La définition du terme "théorie" est toujours très discutable et variable [Nadeau 1999] et mon objectif n'est certainement pas de débattre sur ce sujet. Mais afin de mieux s'entendre, on peut considérer ici une définition très large : "le terme « théorie » désignera tout système intellectuel (c'est-à-dire constructible par le pouvoir synthétique de la pensée humaine) à visée explicative ou prédictive" [Varenne, 2003]. Car si toute manipulation de symboles peut-être considérée comme la formulation d'un modèle [Le Moigne, 1990], toute connaissance, aussi primitive soit-elle est théorie [Danchin, 1978]. Dans cette optique, on admet avec [Reitz, 1992] que les modèles constituent des interfaces entre le monde et les théories, c'est-à-dire "des médiateurs entre les théories et les données de l'expérience" [Varenne, 2006]. Si on s'accorde sur ce sujet alors les modèles sont des instruments d'investigation et de recherche, c'est-à-dire des outils pour aider à penser et peut-être pour générer des théories. Les termes de modèles et de théories sont si proches que je considérerai pour la suite de ce chapitre qu'il est possible d'appliquer les concepts de la validation des théories aux modèles.

L'inductivisme et le falsificationisme, les deux démarches scientifiques les plus connues, apportent deux points de vue différents sur le fonctionnement de la science et sur l'idée de vérité qu'elle véhicule.

1.3.2.2 L'inductivisme

Selon l'approche inductiviste (ou analytique), l'idée de vérité scientifique vient de la répétition d'un phénomène. On ne tient pour vrai que ce qui peut être reproductible. Selon cette école de pensée, les savoirs scientifiques c'est-à-dire les lois, théories et modèles se construisent à partir de données d'observation qui constituent des fondements sûrs. Ainsi, sur la base d'observations, une théorie (ou un modèle) est établie a posteriori en suivant une démarche inductive basée sur la logique qui peut se résumer de cette façon : si au cours d'une série limitée d'observations d'objets O, une propriété P apparaît pour chaque objet, alors on en induit que tous les O possèdent P. "Tous les O possèdent P" devient une généralisation légitime (une loi) uniquement si les observations de P sont menées dans un grand nombre de conditions différentes.

A partir d'un corpus de lois, de plus en plus important au fur et à mesure de la progression de la science, on peut expliquer des phénomènes sur une base logique. Par déduction, on est aussi capable de prédire l'évolution d'un système ou l'apparition d'événements. Ainsi, les lois de l'optique, induites d'expériences de laboratoire, sont utilisées avec succès pour concevoir des instruments d'optique ou pour expliquer la formation d'un arc-en-ciel. De même, les lois de

l'astronomie induites de l'observation des planètes permettent de prédire l'occurrence des éclipses. Le schéma suivant résume les deux démarches inductive et déductive de l'approche analytique.

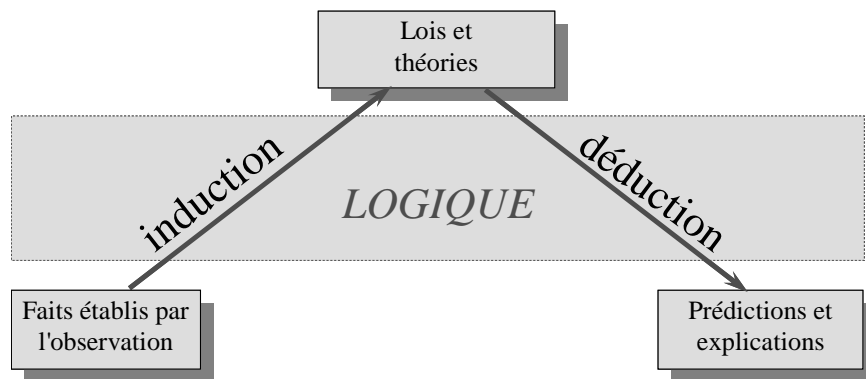


Figure 1-3 : Démarche inductiviste, d'après [Chalmers, 1982]

La méthode analytique fournit une explication logique des faits. Une déduction logiquement valide se caractérise ainsi : si les prémisses⁶ sont vraies, alors la conclusion doit nécessairement être vraie. Alan Chalmers emploie pour cette approche le terme "d'inductivisme naïf" [Chalmers, 1982] dont l'attrait est qu'il procure à la science, "sa puissance explicative et prédictive, son objectivité et le crédit plus fort qu'on peut lui accorder en comparaison avec d'autres formes de savoir". En effet, la dimension personnelle et subjective, n'y a pas sa place.

1.3.2.3 Critiques de l'inductivisme

La première critique à l'encontre de l'inductivisme concerne le problème du passage d'un ensemble d'observations ("énoncés singuliers") à un énoncé général ("loi empirique"). Ce passage s'effectue par généralisation à partir d'un certain nombre d'observations. Or cette induction pose problème, car quel que soit le nombre d'observations, une observation ultérieure peut toujours contredire cette généralisation. Par ailleurs, on ne peut "qu'émettre les plus grandes réserves sur la clause du «grand nombre» d'observations" [Chalmers, 1982]. Ainsi, la répétition perpétuelle de la course du soleil dans le ciel, a induit le géocentrisme. A l'opposé, il n'est pas nécessaire de mettre sa main de nombreuses fois au feu pour s'apercevoir que ça brûle !

La deuxième critique de l'inductivisme concerne le problème de l'objectivité des observations. En effet, la méthode analytique prend appui sur la base plus ou moins sûre donnée par l'expérience et les sens. Mais comme je l'exposerai dans le chapitre suivant, nous sommes structurés par notre langage et notre culture qui façonnent une appréhension spécifique du monde, une façon de penser déjà orientée. Dans l'énoncé des observations, nous sélectionnons au préalable les variables que nous considérons déterminantes. La vision que l'on a des faits est une image mentale *construite* par notre cerveau et interprétée pour être "re-présentée" [Watzlawick, 1978], [Piaget, 1968], [Damasio, 1999]... En d'autres termes, "la théorie joue un rôle crucial *préalablement* à l'observation" [Chalmers, 1982] : elle oriente l'observation.

"[La connaissance de la connaissance] nous oblige à adopter une attitude de vigilance permanente à l'égard de la tentation de la certitude. Elle nous oblige à reconnaître que la certitude n'est pas une preuve de vérité. Elle nous oblige à réaliser que le monde que chacun peut voir n'est pas le monde mais un monde que nous faisons émerger avec les autres. Elle nous oblige à nous rendre compte que le monde serait différent si nous vivions différemment" [Maturana & Varela, 1994]

Une troisième critique concerne les rapports entre la logique et les prémisses. "L'apport de la logique se limite à assurer que, si les prémisses sont vraies, alors la conclusion doit être vraie. Mais la logique ne permet pas de savoir si oui ou non les prémisses sont vraies" [Chalmers, 1982] : un raisonnement logique reste valide même si les propositions sont fausses. Exemple : (1) tous les

⁶ Les faits, les propositions; à distinguer des prémices !

chats ont 5 pattes ; (2) Minouchat est un chat, donc (3) Minouchat à 5 pattes. La proposition (1) est fausse mais le déroulement logique est juste. L'expérience du rat superstitieux que j'ai relatée précédemment est une illustration plus concrète. Les mimiques qu'il développe pour attendre les huit secondes nécessaires à la libération de la nourriture, lui paraissent la meilleure explication logique. La répétition de ses expériences prouvera sa vision de la réalité et confirmera ses convictions. Une fois enracinée, cette interprétation des événements résiste à toutes objections, car elle paraît logique.

Enfin certains refusent l'idée d'une seule logique possible. "La méthodologie analytique est volontiers tenue pour LA méthode scientifique par excellence" [Le Moigne, 1990]. La Logique Formelle, encore appelée Logique Disjonctive (logique du "OU") repose sur les 3 axiomes d'Aristote. Les bases de la réflexion analytique n'affectent pas ces 3 axiomes, "tant ils sont présumés donnés par la nature des problèmes". Aussi, "s'il s'avère qu'aucun système logique existant ne convient à une certaine problématique scientifique, alors il faut inventer un nouveau système logique" [Feyerabend 1987, cité dans Le Moigne, 1990].

On peut également objecter que des théories nouvelles ne sont pas toujours conçues selon le schéma de l'inductivisme naïf. Elles peuvent par exemple apparaître grâce à des éclairs d'inspiration comme la découverte de la loi de gravitation apparue par Newton observant la chute d'une pomme, ou par accident comme Roentgen qui découvrit les rayons X en se demandant pourquoi ses plaques photographiques avaient noirci alors qu'elles étaient rangées dans un tiroir à proximité d'un tube à décharge. Par ailleurs, beaucoup de théories sont conçues (en physique principalement) avant que des observations puissent les tester.

1.3.2.4 Le falsificationisme

Sous l'impulsion des travaux de Karl Popper, la critique de l'inductivisme a ouvert la voie au falsificationisme (ou réfutationnisme) qui porte un regard différent sur ce qu'est une théorie ainsi que sur les conditions et les méthodes de son évolution. Popper rejette l'idée selon laquelle la science avance par déductions. Elle ne fabrique pas de théories par inductions logiques à partir d'instances particulières (des observations empiriques) : "l'induction, c'est à dire la déduction à partir de nombreuses observations, est un mythe" [Popper, 1985].

Sa critique s'appuie sur l'exemple suivant : observer que tous les cygnes que j'ai vus jusqu'à présent sont blancs ne permet pas d'affirmer (d'induire) que tous les cygnes sont blancs. Cette critique de l'induction le conduit à remettre en cause l'idée de preuve. Au terme *vérification* qu'il réproche, Popper propose celui de *corroboration*, c'est-à-dire d'une observation qui ne contredit pas une théorie (une nouvelle observation d'un cygne blanc). Par conséquent, un grand nombre d'expériences qui corroborent une théorie, ne permettent pas de conclure à sa validité. La répétition d'observations et les expérimentations fonctionneraient alors comme des tests de ces conjectures⁷ c'est-à-dire comme des essais de *réfutations*. Selon Popper, il n'y a pas de validation définitive; il n'y a pas de preuve absolue d'une théorie mais uniquement des réfutations de conjectures mauvaises. On ne retient une hypothèse que lorsqu'on ne peut pas la réfuter. Ainsi, une preuve reste une preuve... tant qu'elle n'a pas de réfutation. Contrairement à la vision inductiviste selon laquelle la science se développe de façon continue sur des succès, le falsificationisme explique que la connaissance scientifique progresse plutôt par bonds et par essais et erreurs.

Le falsificationisme se sert des observations (des énoncés singuliers) pour tester une théorie (un énoncé universel). Un seul contre-exemple suffit alors à réfuter un énoncé universel. D'après Popper, "toute théorie étant intrinsèquement fausse", il est préférable de découvrir au plus tôt ses faiblesses au lieu de perdre son temps à essayer de la corroborer.

⁷ Il considère que les théories sont des conjectures (ou des suppositions spéculatives) inventées pour décrire, donner sens ou résoudre des problèmes.

"Si notre préférence va à une telle démarche, c'est que nous estimons être ainsi en mesure de tirer un enseignement de nos erreurs en découvrant que la conjecture en question était fausse, nous aurons beaucoup appris quant à la vérité, et nous nous en seront d'avantage approchés" [Popper, 1985].

Souvent présentées comme opposées, ces deux approches (inductivisme et falsificationisme) sont pourtant complémentaires sur certains points : l'inductivisme décrit une méthodologie de construction de théories quand le falsificationisme définit un cadre de validation des théories construites.

1.3.2.5 Critiques du falsificationisme naïf

Le falsificationisme souffre de la même critique qu'on adresse à l'inductivisme : l'observation empirique sensée réfuter une conjecture n'est pas infaillible parce qu'elle présuppose une interprétation préliminaire qui, elle, est faillible.

Une autre critique plus conséquente concerne la preuve par prédiction a posteriori. En mettant l'accent sur la réfutation d'une théorie au détriment de sa validation, le falsificationisme ne rend pas compte de grandes découvertes scientifiques qui ont *prouvé* leur valeur non pas à la suite d'une résistance à des réfutations mais après la vérification expérimentale d'une prédiction originale. La découverte de Neptune par Galle en 1846 est un bon exemple : Neptune fut la première planète dont l'existence avait été auparavant prédite uniquement par calcul. La découverte après coup de sa présence a encore renforcé le succès de la mécanique newtonienne.

L'aspect improductif est également reproché au falsificationisme. Disciple de Popper, Imre Lakatos a ensuite critiqué sa méthodologie. Pour lui, une théorie peut être protégée de la falsification en avançant des hypothèses ad hoc, par exemple en excluant des observations gênantes. D'autre part, il dénonce l'aspect non constructif du falsificationisme. Une théorie étant en général bâtie sur un ensemble d'hypothèses, sa réfutation en bloc ne permet pas vraiment d'identifier les hypothèses mises en causes. La prédiction incorrecte vient peut-être d'une hypothèse erronée ou de quelque partie de la description des conditions initiales. Ainsi, la falsification pure et simple d'une théorie fausse n'est pas constructive. Plutôt que de la réfuter, il est préférable de mieux déterminer son domaine de validation ou de la réajuster pour l'améliorer. D'ailleurs, à l'instar de la révolution copernicienne qui s'est déroulée pendant plus d'un siècle, l'établissement d'une théorie demande du temps et des ajustements, or ceux-ci sont infaisables dans une démarche falsificationiste pure. Selon Feyerabend, il faut laisser vivre une hypothèse plus ou moins réfutée, tant qu'elle est dynamique et qu'elle évolue. Pour lui, la réfutation n'est pas acceptée comme étant le critère ultime ou suffisant pour le test scientifique, opinion que partage H.A. Simon :

There is a saying in politics that « you can't beat something with nothing ». You can't defeat a measure or a candidate simply by pointing to defects and inadequacies. You must offer an alternative. The same principle applies to scientific theory. Once a theory is well entrenched, it will survive many assaults of empirical evidence that purports to refute it unless an alternative theory, consistent with the evidence, stands ready to replace it. [Simon, 1978]

1.3.2.6 Pas de critère absolu pour légitimer une théorie

*En vérité, la vérité, il n'y a pas de vérité !
Jean-Claude Van Damme*

Le rationaliste Lakatos reconnaît que "le problème central en philosophie des sciences est [...] celui d'établir des conditions universelles déterminant qu'une théorie est scientifique" [Lakatos, 1974, cité dans Barboux, 1990]. Car, estime-t-il, en essayant de définir des normes de rationalité, "la méthodologie des programmes de recherche peut nous aider à inventer des lois pour endiguer... la pollution intellectuelle" [Lakatos & Musgrave, 1974, cité dans Chalmers, 1982]. Ces remarques montrent, qu'à l'opposé de Feyerabend qui prône le "tout est bon", Lakatos, lui, considère que la science est plus à même d'atteindre la vérité. Elle mène à une approche asymptotique de la vérité.

Les falsificationnistes comme Popper soutiennent que la science a progressé en se rapprochant toujours de la vérité. "Au fur et à mesure qu'une science progresse, la vérissimilarité de ses théories augmente régulièrement" [Popper, 1985]. Les termes vérissimilarité ou vérissimilitude qu'il propose évoquent la proximité d'un savoir avec la vérité. Mais cette distanciation vis-à-vis de la preuve irréfutable oblige à un discours plus modéré. La pensée critique de Popper implique que les scientifiques renoncent à leurs certitudes. C'est une attitude difficile à assumer car elle est contraire à notre état d'esprit quotidien :

"Nous avons tendance à vivre dans un monde de certitude, de perceptions indiscutables, catégoriques. Nos convictions démontrent que les choses sont comme nous les voyons, et nous n'envisageons pas d'autres possibilités pour ce que nous tenons pour vrai. C'est notre situation quotidienne, c'est ce que nous impose notre culture, c'est notre manière habituelle d'être humain."
[Maturana & Varela, 1994]

Dans ses "Pensées", Pascal exprimait déjà cette opinion : "C'est une maladie naturelle à l'homme de croire qu'il possède la vérité". On comprend alors qu'il n'existe pas de norme de rationalité universelle. Ce qui est jugé meilleur ou pire varie d'une communauté à l'autre. C'est l'idée que défend Thomas Kuhn qui constate qu' "il n'y a pas d'algorithme neutre pour le choix d'une théorie" [Kuhn, cité dans Chalmers, 1982]. Il n'y a pas de critère absolu, même si la détermination de tels critères était bien l'un des objectifs de l'épistémologie. Après avoir retracé l'histoire des concepts de l'épistémologie, Chalmers [1982] conclue :

"les philosophes ne possèdent pas les moyens de légiférer sur le critère à satisfaire pour juger acceptable ou « scientifique » un domaine du savoir. Il n'y a pas de critères absolus pour évaluer ou juger une théorie [...] Nous pouvons uniquement nous demander quels sont ses buts, quels sont les moyens utilisés pour y parvenir et quel degré de succès ils atteignent."

1.3.2.7 Si rien n'est sûr, alors tout se vaut ?

Accepter l'opinion de Popper selon laquelle toute théorie est intrinsèquement fautive (dans le sens d'un refus d'une quelconque validation forte sous-entendant la vérité) et adhérer aux principes constructivistes, peut fragiliser les fondements de la science. A ce sujet, l'allégorie de la science utilisée par Popper est éloquent :

La base empirique de la science objective ne comporte donc rien d' « absolu ». La science ne repose pas sur une base rocheuse. La structure audacieuse des théories s'édifie en quelque sorte sur un marécage. Elle est comme une construction bâtie sur pilotis. Les pilotis sont enfoncés dans le marécage mais pas jusqu'à la rencontre de quelque base naturelle ou « données » et, lorsque nous cessons d'essayer de les enfoncer d'avantage, ce n'est pas parce que nous avons atteint un terrain ferme. Nous nous arrêtons, tout simplement, parce que nous sommes convaincus qu'ils sont assez solides pour supporter l'édifice, du moins provisoirement. [Popper, 1973]

On peut penser que toutes ces discussions sont fumeuses et stériles. Mais elles ont des répercussions sur la vie de chercheurs (accréditation d'un programme de recherche) ainsi que sur notre vie quotidienne. Cette apparente fragilité ne doit pas être la porte ouverte à un relativisme absolu qui considérerait que les théories sont aussi valables les unes que les autres. Ainsi par exemple, dans l'exercice qui consiste à dénigrer 150 ans de recherche sur l'évolution des espèces, les créationnistes dit scientifiques profitent de ces controverses sur la rationalité des sciences pour colporter leurs idéaux avec la volonté de fonder scientifiquement les récits bibliques⁸. Le plus inquiétant est qu'ils utilisent ces arguments pour exiger que les théories créationnistes soient enseignées dans les écoles au même titre que la théorie de l'évolution. Leur stratégie de

⁸ Une volonté de "combattre la science sur son propre terrain, trouver et promouvoir les preuves scientifiques en faveur d'une interprétation littérale de la Genèse biblique. Ainsi la terre n'aurait que 6000 ans et les fossiles seraient expliqués par le déluge. Deux siècles de géologie et de paléontologie sont réinterprétés de fond en comble ; au besoin par le moyen d'expérimentations, et la biologie évolutionniste niée de manière à ce que la bible soit « scientifiquement prouvée » ". [Lecointre, 2004]

communication consiste alors à affirmer que la théorie darwinienne "n'est qu'une théorie", suggérant par-là qu'elle n'est pas plus valable qu'une autre⁹.

S'il est indispensable pour l'ouverture d'esprit, le doute scientifique ne doit pas céder la place à un relativisme absolu où toutes opinions se vaudraient, où les croyances et les savoirs seraient du même ordre. Maturana et Varela ne partageraient peut-être pas cet avis lorsqu'ils écrivent que :

"Une explication est toujours une proposition qui reformule ou recrée les observations d'un phénomène, dans un système de concepts acceptables par un groupe de gens partageant les mêmes critères de validation. La magie par exemple, est une explication aussi valable pour ceux qui l'acceptent que la science pour ceux qui l'acceptent". [Maturana & Varela, 1994]

Mais ce qui différencie la magie ou la croyance d'une connaissance scientifique c'est peut-être bien la méthode basée sur la réfutation. Les auteurs proposent alors de distinguer quatre conditions essentielles à l'élaboration d'une explication scientifique :

- a) Décrire le phénomène d'une façon acceptable par un groupe d'observateurs.
- b) Proposer un système conceptuel capable d'engendrer le phénomène à expliquer d'une manière acceptable par un groupe d'observateurs (hypothèse explicative).
- c) Obtenir à partir de (b) d'autres phénomènes non considérés de façon explicite dans cette proposition, et décrire leurs conditions d'observation par un groupe d'observateurs.
- d) Observer ces autres phénomènes obtenus à partir de (b).[ibid.]

Pour ce dernier point (d), l'observation effective de phénomènes, initialement prévus par la théorie ou le modèle mais non explicités, joue comme la confirmation d'une prévision (cf. la découverte de Neptune). Mais le fait de décrire "d'autres phénomènes" qui peuvent être observés, range à mon sens cette proposition dans la démarche falsificationniste. Le degré de falsifiabilité permet de classer des propositions en leur donnant une valeur informative.

1.3.2.8 La valeur informative d'une théorie

A mon sens, l'intérêt du réfutationnisme repose sur la notion de *valeur informative* d'une théorie : Popper considère qu'une théorie n'est valable que si elle est falsifiable, c'est-à-dire que les assertions qu'elle produit sur le monde peuvent être réfutées ou corroborées. Une théorie est alors qualifiée de bonne théorie si elle présente un haut degré de falsifiabilité : plus elle énonce d'assertions sur le monde, plus elle est falsifiable et meilleure devient-elle en résistant à chaque fois aux tests. D'ailleurs, plus une théorie est générale, plus elle est falsifiable car elle prend le risque d'exposer un plus grand nombre d'énoncés.

Selon Popper, plutôt que de rechercher des propositions invérifiables, le scientifique doit produire des énoncés réfutables. C'est cette réfutabilité qui doit constituer le critère de démarcation entre une hypothèse scientifique et une pseudo-hypothèse.

En effet, des hypothèses non réfutables produisent des théories *ad hoc*, c'est-à-dire qu'il est impossible de concevoir un événement qui puisse les réfuter. Souvent, une hypothèse *ad hoc* est rajoutée à une théorie contredite par une observation afin d'éviter de la remettre en cause, en expliquant par exemple qu'il s'agit d'un cas particulier. Revenons sur l'exemple de la découverte de Neptune : l'orbite d'Uranus n'obéissait pas à celle prévue par les lois de Newton. A cette réfutation, on aurait pu en première instance tirer deux conclusions : soit l'observation était incorrecte, soit les lois de Newton étaient erronées. On aurait pu également rajouter l'hypothèse *ad hoc* selon laquelle

⁹ Cela suggère également une dépréciation des théories par rapport aux faits "Cette vision implique que seul le fait, n'importe quel fait, serait noble et surtout s'exprimerait de lui-même, laissant les théories au niveau des spéculations sans fondements ni preuves.[...] Par conséquent, tout manipulateur habile a recours aux seuls «faits». Le mot est d'autant plus martelé que l'on veut vous empêcher d'identifier toute la construction théorique ou la représentation du monde qu'il y a derrière." [Lecointre, 2004]

Neptune échappait à la mécanique newtonienne parce qu'elle était la dernière planète du système solaire. Cet ajustement est ad hoc (donné pour l'occasion) et irréfutable dans le sens où il n'existe aucun moyen de le démentir. Il appauvrit la théorie. On a par contre proposé une autre hypothèse réfutable : l'orbite d'Uranus serait en fait perturbée par une autre planète dont les moyens d'observation de l'époque ne rendaient pas compte. Cette seconde hypothèse est réfutable car elle prend le risque d'affirmer la présence d'un autre corps céleste dont la position et la masse sont définies à partir de la formule de Newton. La découverte de Neptune a posteriori a corroboré cette hypothèse et a renforcé dans le même temps la théorie newtonienne. Mais si les nouvelles lunettes astronomiques n'avaient pas décelé cette planète, alors la réfutation aurait été avérée¹⁰.

On conçoit donc qu'une "bonne théorie est audacieuse". Si l'on veut progresser dans la connaissance, il faut prendre des risques : risques de formuler des hypothèses non évidentes et surtout falsifiables. La théorie produite acquiert alors une valeur informative. De plus, une théorie doit être plus falsifiable encore que celle qu'elle cherche à remplacer. Elle doit par exemple oser décrire un nouveau phénomène que l'ancienne théorie n'avait pas envisagé.

Somme toute, confirmer une conjecture prudente est peu informatif : passer son temps à faire tomber des pommes ne nous apprend plus grand chose ! Il en va de même pour la réfutation d'une conjecture audacieuse : montrer qu'une idée extravagante est fausse n'est finalement pas très instructif. Par contre, confirmer une conjecture audacieuse ou falsifier une conjecture prudente produisent des informations significatives qui contribuent à enrichir les savoirs :

"La croissance du savoir se produit soit par confirmation d'une conjecture audacieuse, soit lors de la falsification d'une conjecture prudente. En même temps la confirmation d'une théorie audacieuse se traduit par une falsification d'une partie du savoir acquis" [Chalmers, 1982]

1.4 DISCUSSION : EVALUATION DES MODELES

Cette petite digression vers l'épistémologie ne nous sert qu'à repositionner la question de la validation des modèles à la lumière des réflexions de cette discipline. Evidemment ce petit détour reste superficiel car les idées des philosophes des sciences sont plus riches et plus étendues que celles que j'ai exposées. Pour un panorama plus approfondi sur ce sujet en relation avec les modèles, on peut se reporter à [Varenne & Phan, 2006], [Ulrich & Troitzsch, 2005] et [Varenne, 2006].

1.4.1 Pas de validation définitive

Il est préférable de considérer qu'à l'instar des théories, tout modèle est intrinsèquement faux. Il est même nécessaire de porter un regard critique à son égard pour remettre en cause les savoirs qu'il véhicule. De ce fait, on ne peut jamais affirmer qu'un modèle est définitivement validé (dans le sens d'une validation forte), même s'il a surmonté victorieusement des tests rigoureux. Un énième test ou un cas de figure particulier pourra toujours le réfuter. A cette occasion, on pourra soit restreindre le domaine d'application du modèle, soit le révisé en relançant une nouvelle boucle d'apprentissage (propositions de Lakatos).

Par contre, on peut heureusement dire qu'un modèle est supérieur à ceux qui l'ont précédé au sens où il est capable de résister là où les autres ont échoué. Dans le même ordre d'idée, René Thom expliquait qu' "un modèle est jugé utile jusqu'au moment où on en construit un meilleur" [Thom,

¹⁰ Autre exemple : la découverte par Galilée des cratères sur la Lune s'opposait à la théorie aristotélicienne qui imposait que les corps célestes soient des surfaces lisses. Pour contredire Galilée on a alors imaginé que les mers de la Lune étaient recouvertes d'une substance invisible qui lui conférait la forme d'une sphère. Cet ajustement est irréfutable car il n'y a aucun moyen de détecter cette substance. Pour contrer ses adversaires, Galilée a utilisé des arguments dignes de la méthode de Watzlawick : il feignit d'admettre la présence de cette substance mais prétendit qu'elle était au contraire située sur les montagnes de la Lune !

1978]. Concernant le problème de la validation, l'auteur rajoutait alors que la notion même de « vérité » ou de « fausseté » d'un modèle n'est guère pertinente :

un modèle (M) est satisfaisant, s'il fournit une réponse satisfaisante à la question (\hat{Q}) qui a motivé la modélisation. Encore faut-il préciser ce qu'on entendra par réponse satisfaisante : ce sera, très souvent, une réponse qui permet la prédiction temporelle sur le comportement du système (X) modéliser. Mais ce pourra être, tout aussi bien, une réponse qui, tout en améliorant en rien nos capacités prédictives sur (X) contribue à améliorer le caractère énigmatique du comportement de (X). [ibid., voir graphique 2-7]

Cependant, je demeure très circonspect sur l'emploi du terme prédiction cité par Thom, tout spécialement à l'encontre des systèmes complexes. Mais je ne suis pas le seul. Dans son article intitulé "Futures, prediction and other foolishness", [Bradbury, 2002] fustige les notions de vérité, validation et prédiction qui gravitent souvent autour des discussions sur les modèles. Les systèmes étudiés dans le cadre des ressources renouvelables sont souvent bien plus complexes que ceux sur lesquels l'épistémologie s'appuie. Ce sont généralement des systèmes adaptatifs avec un grand nombre d'entités pouvant évoluer. Or si la mécanique newtonienne permet de prévoir précisément la dynamique de quelques objets (dans un certain domaine), un modèle climatique, un modèle de marché boursier ou encore un modèle de paysage n'est capable d'aucune prédiction exacte sur son évolution.

Du reste, le même constat est avoué dans le domaine des systèmes naturels. Dans un article paru dans "Science" intitulé "Verification, Validation and Confirmation of numerical models in the earth sciences" et qui fit grand bruit, [Oreskes et al., 1994] lancent cet avertissement sur l'impossibilité de validation. Ils expliquent cette incapacité par le fait que les systèmes naturels ne sont jamais des systèmes fermés et que les résultats des modèles ne sont jamais uniques.

1.4.2 Modèles Ad Hoc

Contrairement aux idées répandues, un bon modèle n'est pas un modèle qui "colle" aux données. Les expériences que j'ai relatées au début de ce chapitre montrent qu'une bonne corrélation entre les sorties d'un modèle et des données observées peut provenir d'un facteur externe non pris en compte par le modèle (graphique d'Odum), ou encore être clairement le fruit du hasard (évolution des captures de lynx et des taches solaires).

Néanmoins, la comparaison des résultats de simulation avec des jeux de données empiriques reste un exercice important. Mais de quelles données s'agit-il ? Il n'est pas rare de trouver des articles exposant les résultats de simulations correctement corrélés avec un jeu de données. Mais est-ce suffisant pour attester de la validité du modèle présenté ? De plus, si ces données ont servi à calibrer le modèle alors évidemment la corrélation risque d'être excellente. Mais n'est-on pas dans ce cas à la limite de l'escroquerie ? Nous sommes alors probablement devant le cas typique d'un *modèle ad hoc*, c'est-à-dire d'un modèle auquel on ne demande qu'à s'adapter convenablement à ses données. Son domaine d'application se limite juste à ce jeu de données. Il ne fournit aucune hypothèse falsifiable sur le procédé qui les a générées; aucune valeur informative et aucun savoir supplémentaire. Bien sûr, ce cas de modèle ad hoc est extrême, mais on peut parfois s'en rapprocher fortement.

Dans le domaine des modèles statistiques, McCullagh et Nelder expliquent que la valeur d'un modèle est qu'il fournit un résumé clair des données. "A première vue, un modèle semble bon lorsqu'il s'ajuste très bien aux données observées, c'est-à-dire lorsqu'il produit des variables simulées très proches de celles observées.[...] Les valeurs ajustées sont choisies pour minimiser certains critères tels que la somme des carrés des écarts. Mais en introduisant un nombre suffisant de paramètres dans notre modèle, nous pouvons le caler aussi bien qu'on le souhaite; en fait, en utilisant autant de paramètres que d'observations, on peut l'ajuster de façon parfaite. Cependant, en procédant de cette manière, nous n'accomplissons aucune réduction de la complexité; nous n'avons

pas produit de modèles théoriques simples. La parcimonie des paramètres est donc la caractéristique souhaitable de tout modèle” [McCullagh et Nelder, 1989].

D'autre part, il ne s'agit évidemment pas d'adhérer au mieux aux données qui serviraient au calage du modèle, mais plutôt d'étendre au maximum son domaine d'application. La comparaison doit alors s'appliquer à de nouveaux jeux de données. Plus on en dispose et plus elles ont été recueillies dans des conditions variées, meilleure sera la confiance dans le modèle s'il surmonte ces tests. Malheureusement la quantité de données nécessaires pose problème, d'autant plus si l'on travaille dans le champ des sciences humaines et sociales où les expérimentations sont difficilement concevables, les collectes sont difficiles à réaliser (voire impossibles) et les données collectées sujettes à caution.

1.4.3 La valeur informative du modèle

A l'opposé du modèle ad hoc, le « degré de falsifiabilité » d'un modèle apparaît être un critère important pour juger de sa valeur : plus un modèle « énonce d'assertions sur le monde », plus il est falsifiable et plus sa valeur informative devient importante. Lorsqu'il présente des concepts audacieux (des idées neuves) qui semblent s'appliquer à des situations variées et s'il n'est pas réfuté, il constitue clairement une amélioration du savoir.

Pour donner un exemple sur ce sujet, on peut s'appuyer sur l'article de Pierre Livet intitulé "Essai d'épistémologie de la simulation multi-agent en sciences sociales" [Livet, 2006]. L'auteur justifie l'intérêt d'un modèle mettant en œuvre un seul mécanisme formel pour expliquer la diversité de phénomènes sociaux. Pour étayer son raisonnement, il s'appuie sur un travail de modélisation mené par G. Weisbuch et ses collègues sur le marché aux poissons de Marseille. Sur ces marchés de grossistes, on identifie deux catégories de clients : les "fidèles" qui s'achalandent toujours chez les mêmes mareyeurs et les "fureteurs" qui changent de fournisseur à chaque marché. La meilleure explication disponible de ces phénomènes (que Livet nomme "scénario rationalisant") est que les bons restaurants qui recherchent des poissons de qualité restent fidèles à leur fournisseur habituel quand les collectivités (cantines...) cherchent les poissons les moins chers. Mais [Weisbuch et al., 1997] ont essayé de trouver une loi sous-jacente à ces phénomènes sociaux pour fournir "un socle théorique plus fondamental que celui des scénarios rationalisant" [Livet, 2006]. L'auteur conclut que si l'explication formelle ne présente pas d'avantage généralisateur alors l'explication par scénarios qui reste la plus simple, est préférable. Mais si le nouveau modèle est à la fois plus simple et plus fondamental (ou plus explicatif), alors il améliore notre savoir et prend le risque d'être plus générique pour expliquer d'autres mécanismes de scénarios. Dans ce cas, "la simulation nous a permis de remonter d'un niveau, [...] elle explique des phénomènes sociaux de manière plus approfondie que ne le font les scénarios sociaux" [ibid.]. Son degré de falsifiabilité est plus élevé.

1.4.4 La confirmation d'anticipation

A l'instar des théories, le modèle doit permettre d'anticiper de façon non évidente des réactions possibles du système qu'il représente. On peut alors l'utiliser pour retracer des évolutions rétrospectives ou pour imaginer des scénarios prospectifs. Ces expériences, si elles sont confirmées, ne valideront pas le modèle; elles permettront simplement d'augmenter notre confiance en lui.

Or un modèle de simulation est un système fermé et il est nécessaire de lui fournir artificiellement des données nouvelles pour évaluer ses réactions. A l'instar des systèmes écologiques ou sociaux qui, eux, sont des systèmes ouverts, un modèle dynamique doit être capable de réagir de façon appropriée (adaptation, réaction, résilience,...) à des fluctuations ou à des événements externes. C'est cette faculté à mimer l'adaptation du système qu'il faut tester. Ce travail ne nécessite pas forcément de données. Si, lors de recherche des similarités, même vagues, on est capable de

repérer des changements de régime, des points de bifurcation ou des transitions de phase, alors "les processus computationnels auront donc démontré leur capacité à mimer l'émergence" [Iivet, 2006].

Mais même ainsi, il est nécessaire de garder une distance critique vis-à-vis de cet outil avant de prendre quelques décisions :

The highest degree of confidence is provided by successful independent predictions, which indicate that the model is structurally realistic. But even after successfully testing a model's independent predictions, we must remember that the model is still just a model and will never be able to represent all aspects of the real system. Modeling and models have momentum of their own, and models that are initially successful pose the risk that modelers will stop distinguishing sufficiently between the real system and their model. [Grimm & Railsback, 2005]

1.4.5 Alignement de modèles

Si l'expérimentation est difficile voire impossible à mettre en œuvre dans le milieu naturel ou dans une société, on ne peut ignorer un aspect important de la validation qui consiste à comparer des modèles. L'idée de cette démarche parfois nommée "alignement de modèles" ou "docking" [Axtell et al., 1996], est de confronter les résultats de plusieurs modèles qui partagent les mêmes objectifs afin de déterminer si leurs conclusions sont effectivement similaires. S'il y a effectivement convergence et si les modèles ont été conçus de façon indépendante par différentes équipes, alors on estime qu'ils sont crédibles.

Cette approche semble encore peu développée dans la littérature. Toutefois, les climatologues en font mention puisqu'ils sont régulièrement confrontés au problème de l'évaluation de leurs prévisions¹¹. Les difficultés qu'ils rencontrent dans la modélisation et les recherches qu'ils mènent sur le domaine révèlent progressivement l'énorme complexité des phénomènes naturels et les difficultés liées à la prévision de l'évolution du climat. Dans le même temps, les capacités d'expertise se sont accrues. Le climatologue Hervé Le Treut évoquant le problème du réchauffement climatique [Le Treut, 1997] montre que face à l'incertitude qui résulte de la complexité d'un système et du manque d'expérimentation, la mise au point indépendante de nombreux modèles, couplée à la comparaison de leurs performances respectives, augmente le crédit que l'on peut avoir dans leurs prévisions lorsque celles-ci tendent vers une même direction. Le concept de variété requis réapparaît pour les modèles.

1.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Un modèle est habituellement considéré comme valide lorsque ses sorties sont proches des données du système qu'il décrit. Or, le terme "validation" demeure problématique car il peut laisser à penser qu'un modèle validé serait juste. Ainsi, à partir du moment où un modèle, quel qu'il soit, serait déclaré comme valide, on pourrait prendre toutes sortes de décisions en se fiant à ses seuls résultats. Il est donc préférable de considérer qu'à l'instar des théories, tout modèle est intrinsèquement faux. Quel que soit le nombre de corroborations qu'il a éprouvées, il est nécessaire de rester sceptique à son égard. Par conséquent, il est préférable d'utiliser le terme d'évaluation plutôt que celui de validation d'un modèle.

Pour autant, tous les modèles ne se valent pas. Sur un sujet donné, ils ne sont pas aussi valables les uns que les autres. Le "degré de falsifiabilité", concept issu de l'épistémologie, permet d'en évaluer la valeur informative. A l'opposé du modèle ad hoc, plus le domaine d'application d'un modèle est étendu, plus son niveau de généralité est élevé ou plus il propose d'explications formelles et plus il

¹¹ La question par exemple est de savoir si le scénario du présent siècle sera celui d'un changement violent (+2°C de température moyenne du globe) ou très violent (5 à 6°C) du climat planétaire. L'un des facteurs à l'origine de cet écart dans les modèles semble être la plus ou moins grande rigueur des politiques de maîtrise et de réduction des émissions qui pourront être menées dans les prochaines années.

prend le risque d'être réfuté. Un bon modèle est donc réfutable. On peut alors le mettre à l'épreuve en évaluant les niveaux de similarité avec des jeux de données (ou s'il en manque, en le comparant à d'autres modèles). Plus on en dispose, meilleure sera la confiance dans le modèle s'il surmonte ces tests. S'il échoue, il faut alors le réviser ou réduire son domaine de validité. Cependant, étant donné qu'il demeure une représentation abstraite, les approximations et même les erreurs lui sont inhérentes [Hagget, 1973].

Le modèle doit également permettre de retracer des évolutions rétrospectives ou d'anticiper des réactions face à des événements probables. On teste ainsi s'il est capable de mimer les réactions du système cible. Mais il ne s'agit pas forcément de comparer ses résultats avec des données observées. S'il mime les grandes tendances ou s'il permet de détecter les changements de phase, alors il n'est pas besoin de calcul de coefficient de corrélation ou de test du χ^2 pour augmenter notre confiance en lui. D'ailleurs, il est plus essentiel de montrer la robustesse de ses résultats que des corrélations fines sur des valeurs précises de paramètres.

Par conséquent, on peut partager les constats que Volker Grimm présente dans le domaine de l'écologie qui peuvent tout à fait s'appliquer pour la modélisation des anthropo-socio-éco-systèmes :

There are no true or false models because all models are, necessarily and deliberately, false to some degree. The only useful general classification of models is 'useful' and 'not useful' with respect to the purpose for which the model was designed.[Grimm, 1999]

Ainsi, la notion d'objectif est prépondérante pour évaluer la pertinence d'un modèle. Alors, la définition la plus adéquate de la validation-évaluation d'un modèle est celle énoncée par [Balci, 1998] : évaluer la pertinence d'un modèle consiste à prouver que, dans son domaine d'applicabilité, celui-ci se comporte avec une justesse satisfaisante en accord avec ses objectifs. Par conséquent, si l'évaluation doit s'effectuer en fonction des objectifs du modèle, il est nécessaire d'en présenter les grandes lignes. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

POURQUOI MODELISER ?

« Nous ne pouvons connaître la réalité en soi ; nous ne connaissons que les noms, les représentations de cette réalité »

Guillaume d'Ockham (1285 – 1349)

L'évaluation d'un modèle peut-elle être dissociée de l'usage que l'on souhaite en faire ? Ce chapitre passe en revue les objectifs qui sont habituellement reconnus aux modèles. Il décrit les différents types de modèles, allant de la représentation statistique d'un grand nombre de données jusqu'aux modèles multi-agents en passant par les outils plus standards de la modélisation mathématique.

2.1 ROLE ET STATUT DES MODELES

2.1.1 Modèles prédictifs et modèles explicatifs

On peut distinguer deux grandes catégories de modèles en science : les modèles prédictifs et les modèles explicatifs. Les premiers visent uniquement à faire des prévisions sans essayer d'expliquer un phénomène. Ce sont par exemple les réseaux de neurones ou les modèles de types météorologiques basés sur des analyses de séries temporelles. A l'inverse, les modèles explicatifs (modèles d'estimation statistiques, modèles mathématiques, systèmes experts et SMA) tentent de proposer une explication (ou une interprétation) sur le fonctionnement d'un système et d'identifier les paramètres clés susceptibles de modifier l'état de ce système.

Bien sûr, la thèse est consacrée préférentiellement à ces modèles explicatifs et plus particulièrement aux modèles de simulation, au statut de la simulation et à la modélisation multi-agent. Mais étant donné que les modèles à équations et les SMA prennent en compte explicitement le temps, il est parfois demandé à ces outils de « prédire » l'évolution d'un système. Il est donc important de faire un point sur le problème de l'anticipation.

Nous ne nous attacherons pas ici à définir ce que sont les modèles multi-agents (le chapitre suivant y est dédié), mais nous essayerons de répondre à la question "qu'est-ce qu'un modèle, au sens plus général ? A quoi sert-il ?".

2.1.2 L'origine étymologique de « modèle » possède deux significations

Le terme de modèle est polysémique. L'histoire de son usage est longue et riche. Les explications étymologiques qui suivent proviennent des notes de S. Bachelard [1978]. Le mot *modèle* vient du latin *modulus* (diminutif de *modus* : mesure), terme d'architecture qui désigne la mesure arbitraire servant à établir les rapports de proportion entre les parties d'un ouvrage d'architecture. Le terme de *modulus* a donné lieu à deux importations successives, au Moyen Age et à la Renaissance. Tout d'abord, *modulus* a donné en vieux français *moule*, en vieil anglais *mould* et en ancien-haut allemand *model* (avec un seul *l*). Au XVI^e siècle un emprunt à l'italien *modello* (venant lui-même du latin *modulus*), employé par la statuaire, a donné en français *modèle*, en anglais *model* et en allemand *modell* (avec deux *l*). Dans la langue courante allemande les deux mots *Model*, *Modell* coexistent actuellement, le mot *Model* (module, moule, matrice) étant un terme de métier. En français, le mot *moule* a subsisté à côté du mot *module* et *modèle* [Bachelard,1978].

Dès son origine, le terme de modèle oscille donc entre deux significations : l'objet matériel et la norme abstraite. Aujourd'hui, le mot « modèle » synthétise les deux sens opposés de la notion d'imitation et de référence. En effet, le modèle désigne soit un objet jouant le rôle d'idéal ou d'étalon que l'on se doit d'imiter (l'exemple à suivre, le modèle du peintre, le modèle du maître vis-à-vis du disciple, le top model qui véhicule les canons de la beauté et s'impose comme la norme), soit un concept ou un objet qui tente d'imiter une réalité (le modèle réduit, la maquette, le modèle du scientifique). C'est évidemment à cette deuxième signification que nous nous référerons pour la suite de cette thèse, mais il est intéressant de garder à l'esprit cette double acceptation : le modèle du scientifique peut par moment devenir une référence, un modèle du genre, qui parfois peut même jouer le rôle de "modèle totalitaire" lorsqu'on l'applique par analogie à d'autres domaines que ceux pour lequel il était conçu [Danchin, 1978]. Les réflexions par analogie peuvent s'avérer fructueuses dans certains cas, mais peuvent parfois conduire à une "nomadisation prétentieuse et obscurantiste", comme le souligne [Gayon, 2002] à propos des méthodes de dynamique des populations appliquées de manière autoritaire à l'évolution culturelle, ou encore à propos du concept de capacité de charge qui depuis son invention il y a 70 ans s'est déplacé du domaine de la démographie à l'écologie, aux dynamiques des populations pour aujourd'hui être utilisé dans le domaine des décideurs politiques [Le Bras, 1996].

2.2 MODELISER POUR IMITER ?

*Suppose we want to inform ourselves about the looks of Gertrude Stein.
Will we learn more from Picasso's famous portrait
of her or from a photograph ?*

[Casti, 1997]

Dans la majorité des publications, il est dit qu'un modèle est construit pour mimer au mieux la réalité. Dans les termes de Alain Pavé, "un modèle est une représentation formelle du monde réel" [Pavé, 1994]. Son but est de fournir une image ou une représentation d'un phénomène réel. Cependant celui-ci n'est pas appréhendable dans son ensemble. Car, pour décrire un système, quel qu'il soit, à quel niveau de détail faut-il s'arrêter ? Faut-il par exemple décrire le niveau microscopique, voire même en-deçà ? D'autre part, un même objet d'étude peut être observé sous différents angles et selon différents critères. La représentation qu'en donne chacun risque alors d'être différente. Ainsi, dans un registre bien différent, un imitateur cherche à saisir certains aspects d'un personnage qu'il caricature en omettant toutes les autres facettes de sa personnalité. Dans le même ordre d'idées, le modélisateur souhaite que son modèle copie au moins certaines variables qu'il considère comme intéressantes ou essentielles.

C'est pourquoi, le réel apparaît si complexe qu'il est illusoire de vouloir le représenter complètement sans gommer des pans entiers de cette réalité. Le modèle (réduit) ne peut pas être une réduction de la réalité sans perte, comme on pourrait l'imaginer à travers une transformation homothétique pure. Les choix et les simplifications opérés sur l'objet étudié pour le re-présenter dénaturent obligatoirement cet objet.

"Les simulations ne peuvent être considérées comme réalistes puisqu'elles se fondent sur des modèles simplificateurs orientés en vue d'un objectif pragmatique. Les modèles sont perspectivistes : ils sont des outils simplificateurs visant un certain objectif. Ils formalisent un point de vue. Or, un point de vue sur la réalité n'est pas la réplique de la réalité. Les modèles sont des fictions et les simulations sont des récitations particulières de ces fictions" [Varenne, 2003].

Pour illustrer le rapport entre modéliser pour imiter et modéliser pour apporter un point de vue, prenons l'exemple de la peinture. Le modèle du peintre, objet en 3 dimensions, est dessiné sur un support plan selon un procédé classique d'imitation qui consiste à donner l'illusion de volumes. Le « modelé » s'obtient par exemple au moyen de hachures ou de dégradés qui soulignent des jeux d'ombre et de lumière. Avec l'impressionnisme, ce procédé est remplacé par des modulations de

touches de couleur suggérant une autre perception de la réalité. La peinture se détache désormais du souci d'imitation. Ainsi, dans le domaine de l'art, le modèle quitte le rôle d'objet à imiter et devient source d'inspiration pour créer une émotion.

Sur cette conception, Casti [1997] décrit les différents types de modèles en raisonnant par analogie. Il compare deux portraits d'une femme (Gertrude Stein), l'un photographié et l'autre peint par Picasso. Si le premier portrait tente d'imiter la réalité, le second met en avant le caractère intime du personnage en capturant seulement certaines parties de son visage. En discutant des avantages et désavantages de chaque représentation, Casti explique que nous comprenons davantage la personnalité de Mme Stein à partir du tableau plutôt qu'en regardant la photographie. D'ailleurs, Picasso lui-même expliquait que « l'art est un mensonge qui nous fait nous rendre compte de la vérité ». En conclusion, Casti associe ces deux portraits à deux approches de la modélisation : l'une est descriptive quand l'autre est explicative. A la lumière de ces réflexions, on peut reconsidérer l'interrogation que Guillaume d'Ockham se posait déjà au Moyen-âge :

"L'ordre que nous percevons n'est peut être pas l'ordre réel de la nature"
Guillaume d'Ockham (1285 – 1349)

Il me paraît donc important d'être prudent avec cette notion d'imitation, d'autant plus que l'idée d'une réalité allant de soi est également une notion délicate qu'il faut aborder avec circonspection. Nous reviendrons sur ces notions relevant du constructivisme dans ce chapitre et plusieurs fois au cours de la thèse.

2.3 MODELISER POUR PREDIRE ?

*Prétendre prévoir complètement le futur, c'est déjà le penser comme passé.
Si tout était toujours et déjà joué, le futur serait en vérité passé.*

Henri Bergson, L'évolution créatrice [1907]

Peut-on prédire ? Sommes-nous complètement déterminés ou notre futur contient-il une part d'incertain ? Sans aborder la notion de libre-arbitre, on peut au moins s'interroger sur le déterminisme des phénomènes physiques abiotiques ainsi que sur celui des êtres vivants et des sociétés. Car, si la prédiction est l'objectif d'un modèle, il faut donner quelques points de vue sur ce sujet.

2.3.1 Déterminisme et sciences prédictives

Au XIX^e siècle, le scientisme triomphant avance l'idée qu'il n'y a de science que prédictive. Lecomte du Nouÿ écrivait : "Le but de la science est de prévoir et non, comme on l'a dit si souvent, de comprendre" [cité par Lévy-Leblond dans Scheps, 1996]. Pour les sciences physiques, la prédictibilité des systèmes a longtemps été associée à leur déterminisme : dans la mesure où l'on connaissait leurs lois, on pensait pouvoir prédire leur comportement au cours du temps. De même, Claude Bernard expliquait qu' "il faut croire en la science, c'est-à-dire au déterminisme". Et cette idée est encore plus ancienne : Galilée affirmait que Dieu avait écrit le livre de l'univers dans la langue des mathématiques. Ainsi les lois de la nature suivraient des règles mathématiques. Mais elles nous sont cachées. D'après Spinoza, "nous n'appelons contingentes les choses qu'en raison de l'insuffisance de notre connaissance". Il suffirait donc de connaître ces lois pour prédire. Alors si elle pouvait être complète et absolue, une telle connaissance semblerait divine ou provenir du « Démon de Laplace » :

"une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les choses dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome. Rien ne serait incertain pour elle et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux" [Laplace, 1825].

D'après la conception déterministe (ou mécaniciste), le futur est entièrement contenu et déterminé par le présent. En acceptant cette idée et en faisant l'hypothèse de pouvoir connaître parfaitement les lois de l'univers ainsi que l'ensemble des conditions initiales, nous serions capables de déterminer avec certitude le futur même dans un avenir lointain. Ce qui signifie qu'en ayant une parfaite connaissance de tous les éléments constitutifs, toutes les relations existantes dans un système, il serait possible d'en prévoir exactement l'évolution.

Donc, en se basant sur les relations de causalité, s'approprier le présent d'un système permettrait non seulement de connaître son passé et mais également de se projeter dans son futur. C'est ce que qu'affirmait Laplace lorsqu'il écrivait : "*nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme cause de celui qui va suivre*".

2.3.2 Déterminisme et hasard : théorie du chaos déterministe

Si l'on considère deux systèmes identiques purement déterministes, on pense naturellement que partant de conditions initiales voisines, les trajectoires des deux systèmes restent ensuite très proches. Ceci n'est pas toujours vrai. Certains systèmes présentent des régimes dit "chaotiques" où des écarts minimes dans les conditions initiales conduisent, en un temps limité, à des prévisions très différentes. C'est ce phénomène qu'exprime la *théorie du chaos déterministe*. Pour ces systèmes dits chaotiques, de toutes petites causes sont susceptibles de produire par amplification de grands effets. Il arrive donc que les effets ne soient pas proportionnels aux causes. Avec le chaos déterministe, le système reste déterministe et pourtant il devient non prédictible. Il garde simplement une part de prédictibilité à court terme.

Des recherches sur ce sujet ont débuté dans les années 60-70 avec la présentation de "l'effet papillon" en 1963 par le météorologue Edward Lorenz, puis avec les travaux du biologiste Robert May (1976) sur le modèle logistique récurrent (présentés au chapitre 5.2.2 et en annexe) et avec l'énoncé des constantes de Feigenbaum (graphe de bifurcation, voir figure 8-2, p. 178), dont l'existence a été découverte simultanément par les français Couillet et Tresser et par l'américain Feigenbaum (1978). Le terme de « chaos » n'a été introduit qu'en 1975 par les deux mathématiciens Li et Yorke. Mais le point de départ de la théorie du chaos est attribué à Henri Poincaré qui, en étudiant la stabilité du système solaire, a révélé le problème de la sensibilité aux conditions initiales («problème restreint aux trois corps»). Car le chaos peut caractériser des systèmes physiques très simples, non complexes et dont on connaît les lois : malgré cela, il est impossible de prévoir à long terme les positions exactes du soleil, de la terre et de la lune.

2.3.3 Démarches prospectives pour découvrir le champ des possibles

Il faut relativiser les réflexions précédentes sur l'imprévisibilité des systèmes déterministes, car la théorie du chaos ne s'applique pas forcément à tous les systèmes. Dans un grand nombre de cas, on est capable d'anticiper l'évolution d'une situation au moins sur le court ou le moyen terme.

On pense alors qu'un modèle de simulation qui retranscrirait correctement les épisodes du passé serait ainsi le meilleur outil pour anticiper les phénomènes à venir. Cette vision des choses n'est pas dépourvue d'arguments, mais elle repose néanmoins sur l'idée de continuité en estimant que les tendances du passé ne seront pas modifiées dans le futur et que les mécanismes à l'œuvre resteront inchangés. Or les systèmes complexes montrent parfois des changements de régimes brutaux liés à des facteurs internes ou externes qui provoquent des dynamiques nouvelles, radicalement différentes de celles que l'on observait antérieurement. C'est d'ailleurs suite à plusieurs échecs des modèles dits structurels (c'est-à-dire qui décrivent les mécanismes sensés diriger l'évolution d'un système), que les premières analyses de séries temporelles ont vu le jour. Sans portée explicative, elles exploitent les propriétés statistiques de nombreuses séries de données. On peut alors déterminer les grandes tendances au sein de ces séries ou bien on cherche à retrouver les séries qui ressemblent le plus aux variations actuelles. On fait alors l'hypothèse que l'évolution en cours

suivra ces séries passées. Depuis quelques années, les prévisions météorologiques par exemple reposent sur ce principe. Mais sur ce terrain, nous entrons dans la catégorie des modèles prédictifs esquissés au début de ce chapitre.

Toujours est-il que dans le cas des modèles de simulation à portée explicative, il est illusoire de croire que les mécanismes qu'ils mettent en œuvre et qui sont censés représenter ceux du système étudié sont suffisants pour prédire complètement et exactement son évolution, pour peu que ce système soit complexe, vivant et ouvert. La prédiction reste donc un terme embarrassant dont l'emploi devrait être évité pour cette catégorie de modèles : les modèles scientifiques ne sont pas des boules de cristal qui révéleraient l'avenir.

Car il ne s'agit pas de considérer l'avenir comme une chose déjà décidée et qui petit à petit se découvrirait à nous, mais comme une chose à faire [Berger, 1958]. Au terme prévision, Gaston Berger préfère celui de *prospéction*, qui est une démarche globale consistant à mieux anticiper les futurs possibles : *le champ des possibles*. Dans le même sens, Bergson estime que si le futur est en grande partie imprévisible, ce n'est pas simplement en raison d'une insuffisance de nos moyens de connaître la complexité du réel, mais c'est en raison de cette complexité même, qui paraît infinie. Pour Bergson qui considère que "notre durée est irréversible", "nous sommes, dans une certaine mesure, ce que nous faisons, et que nous nous créons continuellement nous-mêmes" [Bergson, 1907]. Alors, en opposition à la conception mécaniciste de Laplace, il estime que prétendre prévoir complètement le futur, c'est déjà le penser comme passé¹².

Si dans le domaine de la physique, les prédictions s'avèrent délicates, les prévisions à long terme ne sont pas envisageables dans le champ économique et social [Godard & Legay, 1992]. Elles ne sont que partiellement décidables [Bousquet et al., 1996].

Toujours dans le domaine de l'économie, [Boussard et al., 2005] expliquent, dans une étude critique du modèle d'équilibre général mondial, que du fait des changements de politique, il est impossible de comparer le modèle avec la réalité comme le voudrait la rigueur expérimentale. "C'est bien là un des défauts de la science économique que de ne pas autoriser ce type d'investigation. En revanche, l'intérêt du modèle est de permettre de pousser la logique d'une politique jusqu'à ses conséquences extrêmes sur une longue période de temps" [ibid.].

Dans le domaine des sciences sociales et de la gestion des ressources renouvelables, il faut également rester très circonspect quant à l'emploi de la prédiction.

« Parce qu'il se situe hors de portée de toute prévision, prendre en compte le très long terme dans l'analyse des problèmes d'environnement implique de se donner des repères ou des objectifs de très long terme par rapport auxquels les chemins d'évolution, possibles ou impossibles seraient envisagés. L'approche du long terme ne peut guère relever que du scénario. » [Weber et Bailly, 1993].

2.4 MODELISER POUR GENERER DES SCENARIOS PROSPECTIFS

Anticiper consiste à imaginer le cours *possible* des événements et de présumer l'avenir. Contrairement à la prévision, l'anticipation ou la prospection consiste à concevoir des modèles de simulation et à les projeter dans le futur pour imaginer des scénarios possibles.

¹² "L'essence des explications mécaniques est de considérer l'avenir et le passé comme calculables en fonction du présent, et de prétendre ainsi que tout est donné". Bergson s'oppose à une perception mécaniste et finaliste de l'évolution : "Sans doute mon état actuel s'explique par ce qui était en moi et par ce qui agissait sur moi tout à l'heure [...] Mais une intelligence, même surhumaine, n'eût pu prévoir la forme simple, indivisible, qui donne à ces éléments tout abstraits leur organisation concrète. Car prévoir consiste à projeter dans l'avenir ce qu'on a perçu dans le passé, ou à se représenter pour plus tard un nouvel assemblage, dans un autre ordre, des éléments déjà perçus. Mais ce qui n'a jamais été perçu, et ce qui est en même temps simple, est nécessairement imprévisible."

En réfléchissant sur ces notions, Gaston Berger a créé le concept de *prospective* qui cherche à connaître les avenir possibles [Berger, 1958]. Ce terme agrège en fait deux autres concepts : la prospection qui est l'exploration de domaines nouveaux, et la perspective qui véhicule les notions de point de vue, de lignes de fuite (en dessin) et de futur. Il s'agit donc d'essayer d'explorer différents futurs possibles vus sous des angles divers.

Ni prophétie ni prévision – concept théologique réservé à la connaissance que seul Dieu aurait de l'avenir, disait Voltaire – la prospective n'a pas pour objet de pré-dire l'avenir – de nous le dévoiler comme s'il s'agissait d'une chose déjà faite – mais de nous aider à le construire. Elle nous invite donc à le considérer comme à faire, à bâtir, plutôt que comme quelque chose qui serait déjà décidé et dont il conviendrait seulement de percer le mystère. [Jouvenel, 1999]

Ainsi, la prospective s'interroge sur le "que peut-il advenir ?". Mais aussitôt elle rajoute "que puis-je faire ?", "que vais-je faire ?" et "comment le faire ?" [Godet, 1991]. L'auteur distingue alors trois attitudes face aux incertitudes de l'avenir : l'attitude passive qui attend de subir le changement, l'attitude réactive qui consiste à attendre le changement pour réagir et l'attitude prospective qui cherche à anticiper les changements. On différencie alors la pré-activité et la pro-activité : "La pré-activité, écrit-il, c'est se préparer à un changement anticipé alors que la pro-activité, c'est agir pour provoquer un changement souhaitable" [ibid.].

La prospective se partage en deux courants de pensée. L'un s'attache à la construction logique de scénarios quand l'autre est davantage orienté sur l'intuition en imaginant l'avenir sur des bases qui ne sont pas forcément du domaine de la logique. Par ailleurs, la prospective peut sembler le pendant de la rétrospective qui cherche à reconstruire l'histoire en y apportant des explications. Néanmoins, comme on vient de le voir, un modèle capable d'expliquer la succession d'événements du passé et d'en reproduire le cheminement, n'est pas forcément le meilleur candidat pour aider à anticiper le futur. Mais à nouveau, nous dérivons vers les problèmes de prévisions, alors que la prospective cherche davantage à explorer des alternatives possibles en élaborant des scénarios.

Une définition du scénario souvent citée est celle proposée par [Kahn & Wiener, 1967] :

Scenarios are hypothetical sequences of events constructed for the purpose of focussing attention on causal processes and decision points

Sur ce sujet, [Börjeson et al., 2006] dressent une typologie des approches par scénarios. Leur étude dépasse un peu le cadre fixé par [Kahn & Wiener, 1967] car elle englobe aussi les approches prédictives. La classification qu'ils proposent est basée sur les principales questions que l'on peut se poser au sujet du futur : "Que va-t-il se passer ?" (prédiction), "Que peut-il se passer ?" (éventualités) et "Comment atteindre un but spécifique ?" (recherche opérationnelle)¹³. Pour chacune de ces questions, [Börjeson et al., 2006] rajoutent deux autres aspects : la structure du système et les facteurs internes et externes, c'est-à-dire les facteurs contrôlables ou non par les acteurs du système en question. Le graphique suivant rend compte de cette typologie :

¹³ Pour la suite de cet exposé, je laisse les termes en anglais qui sont plus classiques et courants : "What will happen?, What can happen? and How can a specific target be reached?" [Börjeson et al., 2006]

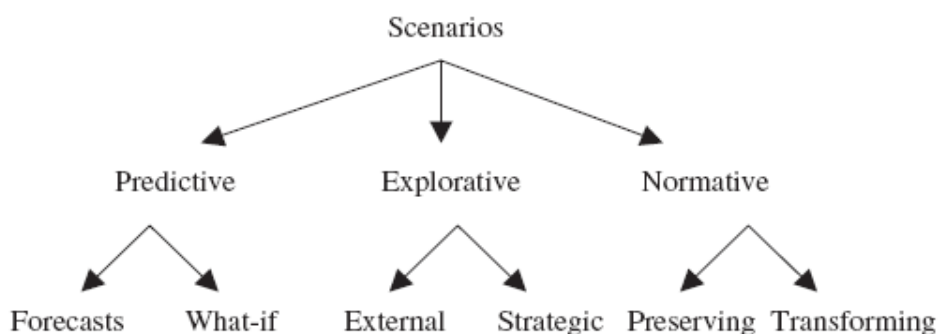


Figure 2-1 : Typologie des scénarios, d'après [Börjeson et al., 2006]

- Les scénarios prédictifs cherchent à répondre à la question "What will happen?". Ils se divisent en deux catégories :
 - "Forecast scenarios" : la prédiction simple où l'on cherche à connaître l'évolution naturelle du système sans intervention. On suppose alors que les lois qui dirigent l'évolution du système continueront à s'exercer pendant la période choisie.
 - "What-if scenarios" : des prédictions sont pronostiquées en fonction d'événements qui pourraient survenir au présent ou dans le futur proche, que ce soient des événements externes ou liés à des décisions internes. Ces scénarios génèrent donc des groupes de prévisions en fonction de quelques événements ou décisions qui pourraient provoquer des bifurcations.
- Les scénarios exploratoires cherchent à répondre à la question : "What can happen?". Cette approche génère des familles de scénarios qui pourraient *éventuellement* se produire. En cela, ils ressemblent aux scénarios de type "What-if" mais sur du plus long terme et prennent en compte des éventualités qui pourraient survenir à des moments plus éloignés sans aucune certitude de ce qui se passera effectivement. Parce qu'elle véhicule l'idée de mieux se préparer à l'éventualité de certaines situations, cette approche est parfois appelée "Thinking by alternatives". Les scénarios exploratoires se divisent en deux catégories :
 - Les "external scenarios" cherchent à savoir ce qui pourrait se passer sous l'éventualité de facteurs externes, hors du contrôle des acteurs impliqués (de type climatique par exemple). Ils permettent de développer des stratégies capables de surpasser ces événements externes. Ils sensibilisent les personnes impliquées à mieux percevoir les signaux même faibles qui pourraient néanmoins être à l'origine de changements radicaux¹⁴.
 - Les "strategic scenarios" incluent des mesures prises par les parties prenantes. Le but est donc de décrire les conséquences probables de décisions stratégiques. On cherchera par exemple à tester des décisions politiques et à décrire leurs effets possibles.
- Les "Normative scenarios" doivent permettre de trouver les façons d'atteindre un objectif donné. Ces approches incluent les techniques de la recherche opérationnelle, de la programmation dynamique et de la programmation linéaire pour essayer de résoudre des problèmes d'optimisation. Concrètement, cela signifie d'établir la manière la plus efficace

¹⁴ On peut citer ici l'exemple de la planification stratégique de la société SHELL pendant les années 70 et 80. L'un de ses responsables a utilisé la méthode des scénarios comme méthode d'apprentissage. "Il montrait comment l'étude de scénarios à probabilité d'occurrence faible par l'ensemble de la Direction, ainsi que les discussions concernant les politiques qu'il faudrait alors choisir, avaient permis à la SHELL d'accroître ses résultats (donc sa « viabilité ») quelques années plus tard, lorsque la situation internationale vit apparaître ces conjonctures supposées a priori improbables" [Alcaras & Lacroux, 1994]

d'atteindre une solution optimale ou proche de l'optimum pour un objectif donné. En fonction des objectifs et des contraintes, on cherche à savoir par exemple ce que devrait faire un individu et on suppose qu'il se comportera alors d'une manière proche de cet optimum. En fonction de blocages qui seraient liés ou non à la structure du système, les auteurs distinguent deux sous-types de scénarios normatifs :

- Les "Preserving scenarios" cherchent à savoir comment atteindre cette situation choisie en ajustant simplement la situation actuelle mais sans changer la structure du système.
- Les "Transforming scenarios" décrivent les modifications qu'il faudrait appliquer au système pour qu'il atteigne la situation visée. Ces scénarios doivent d'abord montrer que la structure actuelle empêche d'arriver à l'état souhaité et que des ajustements à la marge ne suffiront pas. Il est nécessaire de transformer plus profondément les mécanismes pour permettre ces changements. Une façon répandue de mener ces scénarios consiste à élaborer collectivement des images des situations futures souhaitées qui servent de base pour discuter des objectifs et prendre des décisions.

Comme on peut le constater, les façons de mener des scénarios sont très variées. Et chaque type de scénario nécessite des outils adaptés. Ainsi, les systèmes multi-agents me semblent être des outils privilégiés pour mener des scénarios exploratoires. Mais au-delà de la question des outils, la façon d'aborder la prospective des systèmes socio-environnementaux dépend de la démarche et de la déontologie de chacun. Car, dès qu'il s'agit de l'action des êtres humains, les conseils d'experts ou les solutions clé en main ont souvent montré leurs limites. Souvent, il ne suffit pas d'imaginer la meilleure piste à suivre, ni de décider seul des façons de faire pour générer effectivement des changements de conduite des acteurs.

La démarche ComMod que j'exposerai au chapitre suivant, aborde la prospective et les scénarios d'une manière originale. Elle s'intègre dans les approches par scénarios exploratoires en impliquant fortement les utilisateurs dans la construction des scénarios.

2.5 MODELISER POUR COMPRENDRE : UN MODELE JOUE LE ROLE DE FILTRE DISCRIMINANT

Tout savoir est une croyance. Ce que l'on voit n'est qu'une illusion donnée par nos sens, comme l'ont bien compris les empiristes Hume et Berkeley : les sens filtrent et traduisent la réalité, nous présentant les choses au travers d'une transformation parfois déformante [Ferber, 1995].

2.5.1 Le modèle, filtre discriminant pour résumer la réalité en une photo plus explicite

En modélisation descriptive, une analyse de données de type ACP (Analyse en Composantes Principales) est probablement la technique de réduction de dimensionnalité la plus répandue. Elle opère sur des tableaux de données mettant en jeu de nombreuses variables. Issue du traitement mathématique des matrices et basée sur des principes de géométrie spatiale, elle permet de synthétiser de grandes quantités de données et d'en dégager les principaux facteurs. Pour cette raison, elle est aussi appelée analyse factorielle. L'ACP, très utilisée comme méthode descriptive, permet de convertir un tableau de données quantitatives, en images synthétiques qui en dégagent les principales structures. Elle opère en détectant des redondances linéaires entre variables, puis en utilisant ces redondances pour effectuer un *changement de repère* approprié. Mais la représentation du nuage de points dans un hyper-espace étant impossible, on cherche à visualiser le nuage obtenu en le projetant sur la "meilleure" photo possible. On considérera empiriquement que

la meilleure photo est celle où l'objet "photographié" s'étale au maximum, parce qu'on espère ainsi en voir le mieux les détails. C'est ce principe d'étalement maximum qui fonde toute l'analyse factorielle : elle permet de résumer la diversité en un petit nombre de facteurs [Bommel, 1996].

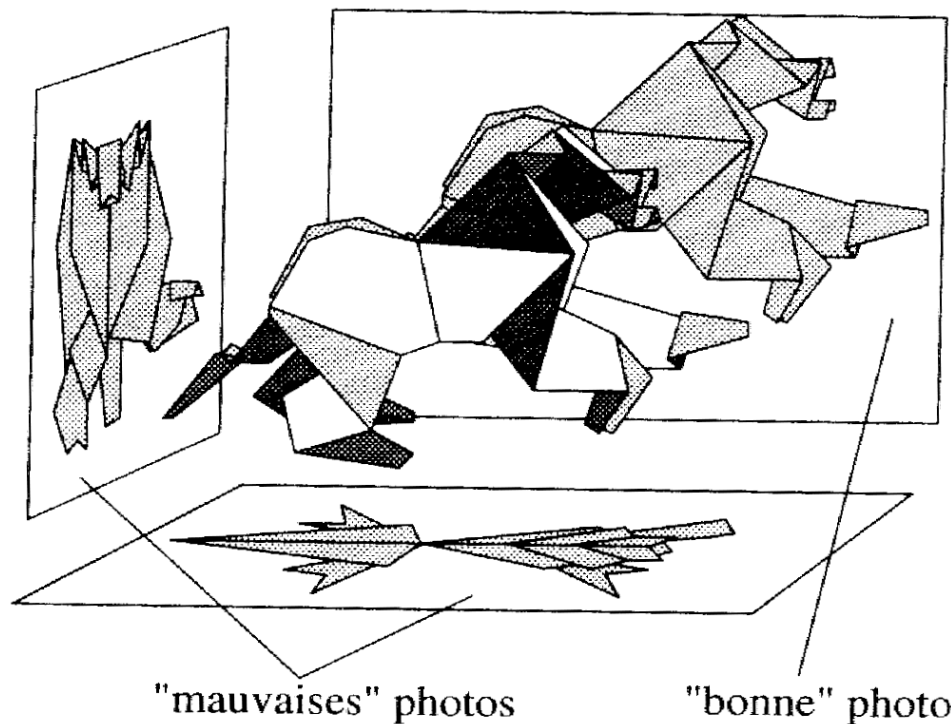


Figure 2-2 : La projection du nuage de points à N dimensions sur un plan fonde le principe de l'ACP. Figure extraite de [Bry, 1995]

De façon plus mathématique, le problème de trouver la "bonne" photo revient à trouver un plan (sous-espace de l'espace multidimensionnel des données) qui reconstruit au mieux l'inertie du système. La variance des distances entre les images projetées doit être maximale. La projection des points-individus s'étire alors au maximum sur le plan dont les axes, déterminés à partir des valeurs propres de la matrice, *expliquent* les caractéristiques principales des données.

Ainsi, un modèle statistique permet de séparer et de classer des variables pour déceler un ordre caché dans un ensemble de données et pour estimer les facteurs qui en expliqueraient le mieux les raisons. Alors, on comprend que d'un point de vue général, "l'intérêt d'un modèle est d'abord d'être plus explicite, plus simple et plus facile à manipuler que la réalité qu'il est censé représenter. Les modèles éliminent ainsi un grand nombre de détails considérés comme inutiles par le modélisateur afin de mieux se consacrer aux données que celui-ci juge pertinentes relativement au problème qu'il désire résoudre" [Ferber, 1995].

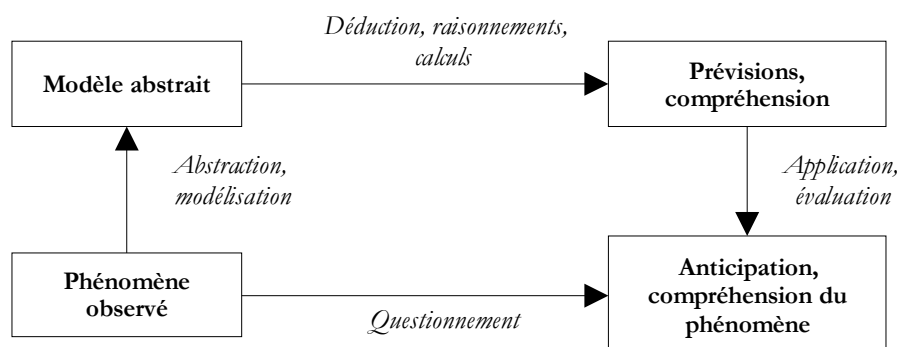


Figure 2-3 : "La prévision et la compréhension de phénomènes passent par l'élaboration de modèles", d'après [Ferber, 1995].

2.5.2 Un filtre discriminant selon les points de vue

En rejoignant [Ramat, 2006], il faut considérer un modèle comme "un filtre conditionné par nos connaissances, nos vérités et nos capteurs". Ce sont des conclusions similaires que je tirais de mon stage de DESS à l'INRA qui consistait à concevoir un SMA dans lequel les agents pouvaient percevoir l'espace à des échelles différentes et à travers des filtres thématiques associés à leur rôle [Bommel, 1999]. Ce travail mené avec Sylvie Lardon consistait à réfléchir aux concepts de groupe ou d'agrégat à travers un modèle théorique portant sur des hiérarchisations dynamiques d'entités spatiales agrégées (modèle Forpast, [Lardon et al. 1998], [Lardon et al., 2000], [Bommel & Lardon, 2000] et [Bommel et al., 2000]). Les deux figures suivantes illustrent cette problématique. La première décrit la manière dont un objet spatial (une prairie par exemple) évolue et change de forme en fonction de dynamiques naturelles de la végétation et d'actions menées par des agents fermiers. La deuxième figure décrit l'évolution de ces objets spatiaux considérés comme l'agrégation d'entités plus élémentaires (des cellules).

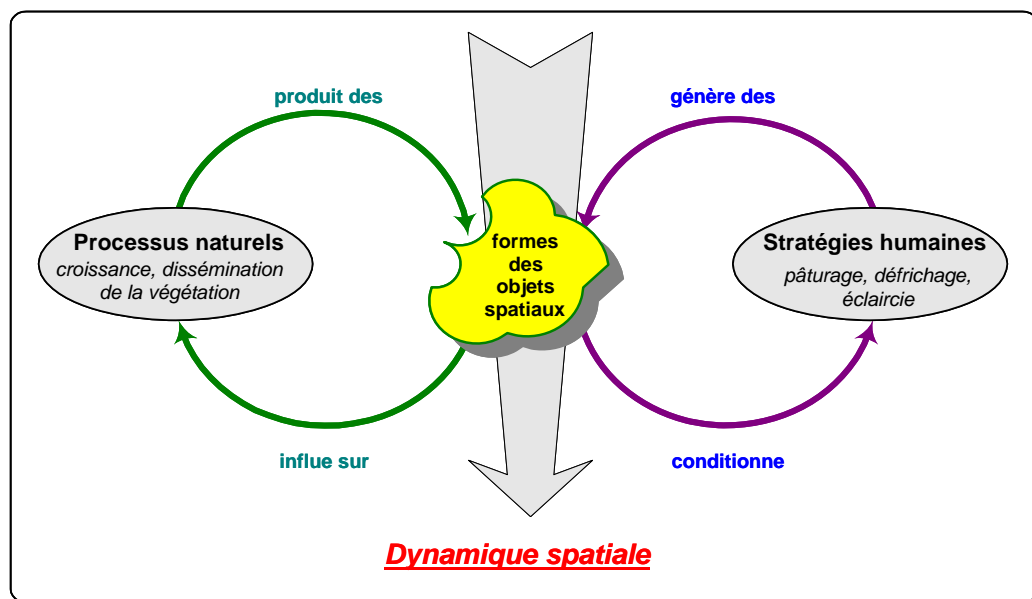


Figure 2-4 : Evolution de la forme des objets spatiaux en lien avec des processus naturels et des stratégies d'agents. L'évolution de la végétation, par croissance et diffusion produit des faciès de végétation. Ces derniers conditionnent les stratégies que les acteurs agricoles mettent en œuvre. Celles-ci modifient à rebours les formes des objets spatiaux.

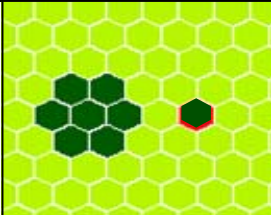
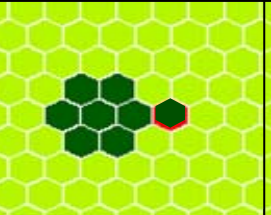
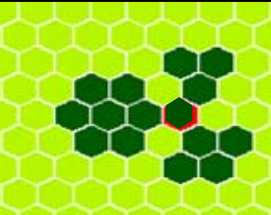
Position de la cellule changeant d' état			
	A: cellule éloignée d'un agrégat	B: cellule en contact avec un agrégat	C: cellule en contact avec plusieurs agrégats
Apparition de l' état	Création d'un nouvel agrégat	Croissance de l'agrégat	Fusion de N agrégats en un seul
Disparition de l' état	Suppression de l'agrégat	Décroissance de l'agrégat	Scission d'un agrégat en plusieurs

Figure 2-5 : Evolution d'un agrégat spatial en fonction de l'apparition ou de la disparition de l'état d'une cellule de même caractéristique.

Ce travail a donné lieu à un outil générique d'agrégation spatiale intégré à la plate-forme Cormas [Le Page et al., 1999]. Mais cette généricité s'arrête à quelques fonctions disponibles pour instancier des objets agrégats. Car ces entités spatiales qui peuvent former une hiérarchie de niveaux d'organisation proviennent de représentations propres à chaque agent. Elles évoluent naturellement mais chaque agent se construit sa propre organisation de l'espace¹⁵.

Ainsi, le concept de groupe ou d'agrégat permet de structurer (strutere = construire) notre représentation de l'espace. Le procédé consistant à regrouper des éléments entre eux, parce qu'il semble évident qu'ils sont reliés, relève en vérité d'un processus bien plus complexe. Expliciter une structuration de l'espace dépend de l'observateur qui décrit ce paysage et de ses objectifs. Selon la personne qui observe, la structuration spatiale qui ressort de cette description peut être très différente d'un acteur à l'autre. Tout se passe comme si chacun percevait le paysage à travers un *filtre* de perception. Ce dernier dépend du rôle de l'observateur, de son histoire, de sa culture et de sa langue. Ainsi, un berger n'aura pas la même perception d'un paysage qu'un propriétaire foncier ou qu'un technicien EDF ou encore qu'un touriste de passage. La vision n'est pas le résultat d'une simple projection du monde sur notre rétine, mais participe d'une série de processus beaucoup plus complexes.

Dans son traité sur "La mathématisation du réel", Giorgio Israel encourage le renoncement à toute tentative d'aboutir à une image unifiée de la nature. Il explique qu' "un modèle mathématique est un fragment de mathématique appliqué à un fragment de réalité. Non seulement un seul modèle peut décrire différentes situations réelles, mais le même fragment de réalité peut être représenté à l'aide de modèles différents" [Israel, 1996].

2.6 DU FILTRE PASSIF A L'AFFIRMATION D'UN REGARD CONSTRUIT

Le sens commun véhicule l'idée que notre représentation du monde est donnée par la nature des choses. Or, de nombreux travaux, notamment ceux des constructivistes avec Jean Piaget [Piaget, 1968], ont montré que cette impression d'évidence procède plutôt d'une construction cognitive et implicite de la part de l'observateur.

Les constructivistes estiment que les représentations de chacun ne sont pas une simple copie de la réalité, mais une reconstruction de celle-ci. Le constructivisme s'attache à étudier les mécanismes permettant à un observateur de reconstruire mentalement une réalité à partir d'éléments déjà intégrés. Dans son traité sur "La pensée visuelle", Rudolf Arnheim explique que toute pensée repose essentiellement sur la perception, que ce soit dans le domaine des arts plastiques, dans les dessins d'enfants, aussi bien que dans celui des images qui se trouvent à l'origine des modèles de la pensée en science. Après avoir énuméré quelques exemples, l'auteur explique que

"il serait fallacieux de prétendre que, dans le domaine de la science, les sens servent uniquement à enregistrer des données à l'instar d'un appareil photographique, et que le traitement de ces données s'effectue ultérieurement au moyen d'opérations éventuellement non sensorielles. Nous estimons au contraire que l'observation directe, loin d'avoir un caractère accidentel, est un mode d'exploration de l'esprit qui, avide de découvrir et d'imposer des formes, a besoin de comprendre, mais en demeure incapable s'il ne projette ce qu'il voit dans des modèles maniables" [Arnheim, 1969].

¹⁵ Prenons l'exemple de la fusion de plusieurs agrégats en un seul : la croissance naturelle de deux bosquets proches peut déboucher sur un contact et une fusion en une forêt. De quel bosquet initial, ce nouvel agrégat hérite-t-il ses caractéristiques ? Quel sera son nom par exemple ? De plus, comment prévenir les agents situés dans ce paysage virtuel que les bosquets qu'ils connaissaient ont fusionné ? On voit avec ce petit exemple que les entités du monde, même pour des agents informatiques, ne sont pas données par nature mais procèdent d'une perception et d'une construction mentale.

Ainsi, la vue n'est pas la simple projection de l'extérieur sur notre rétine. La vision est essentiellement sélective. Elle est le fruit d'une discrimination perceptive et "le monde qui se dégage de [notre] exploration perceptive n'est pas immédiatement donné. Certains de ses aspects se forment vite, d'autres lentement ; et ils doivent tous être continuellement confirmés, réévalués, modifiés, complétés, corrigés, approfondis" [ibid].

Dans un domaine bien différent, les réflexions sur la notion de *représentation* conduisent le neurobiologiste A. R. Damasio à affirmer que notre cerveau produit constamment des images. Mais d'après lui, "les images que nous voyons mentalement ne sont pas des fac-similés de l'objet donné mais plutôt des images des interactions qui se nouent entre chacun d'entre nous et un objet auquel notre organisme est exposé, interactions construites sous forme de configuration neuronale déterminée par les caractéristiques propres de l'organisme" [Damasio, 1999]. L'auteur explique alors que "le cerveau est un système créatif qui ne se contente pas de refléter l'environnement autour de lui [...] : chaque cerveau construit des cartes du même environnement en fonction de ses propres paramètres et de sa structure interne". Ces notions de neurobiologie confirment les hypothèses des constructivistes. Damasio constate que le concept de représentation est chargé de présupposés. Il explique alors que ce n'est pas tant l'ambiguïté du terme représentation qui pose problème, mais "son association avec l'idée selon laquelle l'image mentale ou la configuration neuronale *représenterait* au sein du cerveau et de l'esprit avec un certain degré de fidélité, l'objet auquel la représentation fait référence, comme si la structure de l'objet était reproduite dans la représentation".

Ces idées n'auraient certainement pas été contredites par Maturana et Varela [1994] qui rejettent l'idée selon laquelle l'environnement imprime ses objets dans le système nerveux. Pour ces auteurs, la représentation mentale est toujours indissociable de l'*acte* de connaissance. Ils remettent ainsi en question l'existence d'une réalité objective indépendante de la manière dont on l'apprend. En d'autre terme, la perception, loin d'être l'enregistrement passif d'un stimulus, est toujours une opération active de l'esprit : un phénomène cognitif.

On conçoit alors qu'un modèle ne peut pas être neutre : il est le produit de notre interprétation du monde, qui donne sens. Que la modélisation soit descriptive ou explicative, le souci de neutralité dont certains se targuent, est un argument irrecevable¹⁶. Quelle objectivité peut-on démontrer dans une peinture, une photographie, une carte ou une analyse de données ? Cette façon d'envisager la modélisation est également partagée par J.L. Le Moigne dans sa "théorie de la modélisation" [Le Moigne, 1977] où il explique qu'il faut exclure l'illusoire objectivité de la modélisation et "convenir que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément".

Cependant, tous ces propos sur la construction des représentations n'excluent pas une même manière de voir le monde. A ce sujet, Damasio explique que "lorsque nous regardons des objets extérieurs à nous-mêmes, nous construisons des images comparables dans nos cerveaux respectifs. Nous le savons parce que nous sommes en mesure de décrire l'objet en des termes très proches, jusque dans les plus petits détails. Mais cela ne veut pas dire que l'image que nous voyons est la copie de l'objet extérieur, quel qu'il puisse être". L'auteur conclut que "c'est parce que nous sommes entre nous suffisamment proche biologiquement parlant pour construire une image

¹⁶ [David et al., 2005] notent à ce sujet la distance qui existe entre la spécification, le programme et l'interprétation d'une simulation d'un modèle multi-agent en sciences sociales. Ils concluent leur article en rejetant la neutralité présumée du concepteur d'une simulation sociale :

"If in computer science there is no computation without representation, and as such there is no computation without interpretation, in social simulation there is no computation without intention. [...There is no] presumable neutrality of the implementer, the social sciences have created, by means of a multiparadigmatic logic, a new methodological conception in computer science, where the implementer plays a decisive role. We are convinced that there will not be consensual methods in social simulation."

semblable d'un même objet que nous pouvons accepter sans protester l'idée conventionnelle selon laquelle nous avons l'image exactement ressemblante de cet objet. Ce qui n'est pas le cas". Je rajouterai que le fait de partager une culture et une langue commune et d'y être complètement immergé, nous permet d'échanger nos points de vue et de croire à l'illusion d'une représentation identique.

Pour résumer, il me paraît très important d'insister sur le fait que la neutralité n'existe pas en modélisation. Pire que cela, prétexter et se conforter dans ce souci d'objectivité et de neutralité pour un modélisateur, est la porte ouverte à toutes sortes de manipulations.

2.7 MODELISER POUR APPRENDRE

2.7.1 Nous pensons par modèles

J.L. Le Moigne considère que "le modèle est une représentation artificielle que «l'on construit dans sa tête»...et que l'on «dessine» sur quelque support physique : le sable de la plage, la feuille de papier, l'écran du «ordinateur»... Autrement dit un système de symboles, un système artificiel (créé par l'homme) qui agence des symboles..." [Le Moigne, 1990]. Toute manipulation de symboles (nombres, textes, dessins) peut en fait, être considérée comme la formulation d'un modèle. Le mathématicien contemporain de Henri Poincaré, Émile Picard, considérait déjà à cette époque que l'activité centrale de notre pensée est de faire des modèles. Dans le même ordre d'idée, A. Danchin postule que "même s'il existe un monde réel, même s'il existe une vérité, il n'est possible de l'atteindre que dans l'univers du discours, du langage, et que notre connaissance de l'univers est celle d'un modèle de l'univers. Toute connaissance, aussi primitive soit-elle est théorie [...]" [Danchin, 1978]. Ainsi, il apparaît que la conception de modèles forme la base de la pensée et de l'abstraction : un objet ou un phénomène perçus sont *reconstruits* afin de n'en garder que les caractéristiques essentielles, celles qui ont une influence sur ce que l'on veut étudier pour en comprendre le devenir.

En travaillant sur l'aspect neurologique de la conscience, Damasio dans "Le sentiment même de soi" [Damasio, 1999] s'interroge sur le rôle que joue la conscience. A quoi sert-elle ? Car s'interroge-t-il "les créatures non conscientes sont capables de réguler leur homéostasie interne, de respirer, de trouver de l'eau et de transformer l'énergie requise par la survie dans le type d'environnement auquel elles sont le mieux adaptées". Mais explique-t-il, les créatures dotées de conscience disposent de certains atouts supplémentaires : "elles peuvent faire le lien entre le monde de la régulation automatique et celui de l'imagination (le monde où des images des différentes modalités peuvent être combinées de manière à produire de nouvelles images de situations encore inédites). Le monde des créations imaginaires – le monde de la planification, des scénarios et de la prévision des conséquences d'un acte – est lié au monde du proto-Soi. Le sentiment de soi établit un rapport entre la faculté de prévoir et les processus automatiques préexistants" [ibid].

En cherchant à expliquer des comportements adaptatifs souvent complexes chez certains animaux, des éthologues et des biologistes ont les premiers initiés des travaux sur l'anticipation. En 1985, le biologiste Robert Rosen propose un modèle général de l'anticipation. La définition qu'il propose repose sur des relations entre connaissances du futur et prise de décision à l'instant présent :

"Un système anticipatif est un système qui contient un modèle prédictif de lui-même et/ou de son environnement lui permettant de changer son état en fonction des prédictions sur les instants futurs" [Rosen, 1985].

L'auteur explique alors que l'anticipation peut se décomposer en deux phases : une phase de prédictions et une phase d'interprétation de ces prédictions. Une formule de P. Ricœur rend compte de cette idée : "Pour qu'un mouvement soit volontaire, il faut que sa représentation précède

son exécution" [cité dans MCX APC¹⁷]. Pour une application de ces concepts aux SMA, on peut se référer à [Doniec et al., 2005 & 2007] et [Stinckwich, 2003].

Ainsi, le besoin de comprendre et d'anticiper nous oblige à concevoir des modèles maniables et à les projeter dans le futur pour imaginer les résultats possibles de nos actions.

2.7.2 La modélisation est un processus itératif d'apprentissage

« Bref, ce qui comptera désormais, dans les sciences comme dans les cultures, ce n'est pas le modèle, c'est la modélisation... »

A. P. Hutchinson, 1982

En acceptant la double étymologie du terme qui allie à la fois la notion d'imitation et de référence, nous pouvons alors admettre qu'un modèle est une référence temporaire sur laquelle s'appuie notre compréhension d'un système. Temporaire, parce que cette représentation est toujours perfectible voire complètement modifiable. La confrontation à d'autres connaissances ainsi que l'expérimentation directe nous permet de réviser les opinions que l'on s'était forgées.

Les analogies que l'on peut faire entre le travail de modélisation et l'étude des processus d'apprentissage ou de représentation apportent des éléments intéressants et constructifs pour la conception et l'évaluation des modèles. Ainsi, il apparaît qu'apprendre et acquérir de la connaissance peut se faire par expérimentation, structuration, anticipation et évaluation. Si l'on admet avec J.L. Le Moigne que nous pensons par modèle, alors la modélisation, la simulation et l'évaluation des résultats procèderaient d'une démarche comparable.

Alors, loin d'être une procédure linéaire et rigide telle qu'elle est souvent présentée (de l'abstraction jusqu'à la "validation"), la modélisation doit être comprise comme un processus actif et itératif d'apprentissage.

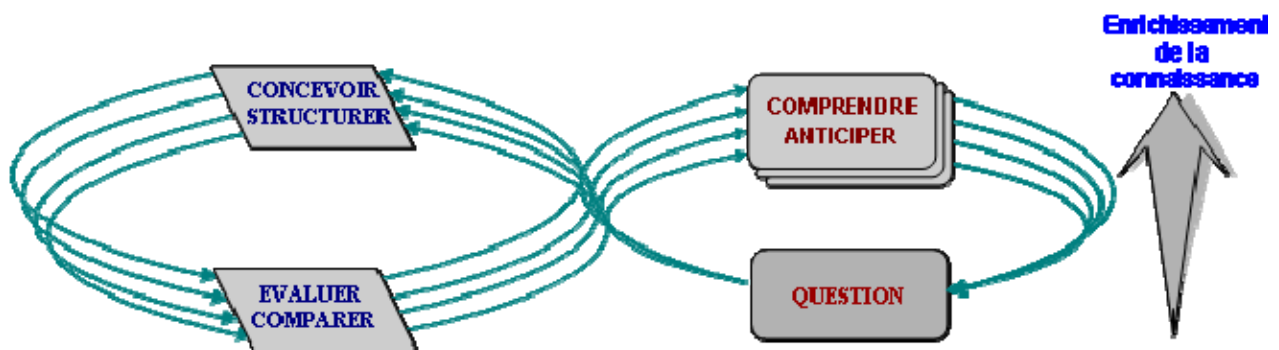


Figure 2-6 : La modélisation : un processus itératif d'apprentissage, adapté d'après [Bommel, 1997b].

Le travail de modélisation est une activité dynamique. Il y a enrichissement itératif de la connaissance par la démarche de conception qui boucle sur son évaluation. Ce processus qui consiste à classer les éléments, comparer et organiser différents points de vue, élaborer et rejeter des hypothèses, oblige à faire des choix et à les expliciter. On conçoit alors que la modélisation est beaucoup plus un exercice de compréhension que de prédiction. Comme le souligne très justement Cariani dans le domaine de la vie artificielle :

"The interesting emergent events that involve artificial life simulations reside not in the simulations themselves, but in the ways that they change the way we think and interact with the world." [Cariani, 1991]

¹⁷ [MCX APC] Dictionnaire de l'association MCX APC : <http://www.mcxapc.org>. Programme européen MCX : "Modélisation de la Complexité"; Association pour la Pensée Complexe dont les piliers sont J.L. Le Moigne et E. Morin.

De mon point de vue, cette notion de modélisation, de processus dynamique me semble plus important encore que le modèle en tant que tel, c'est-à-dire le produit fini. Le fait d'aborder les problèmes par une démarche constructive d'apprentissage me paraît plus enrichissante encore qu'une représentation déjà conçue à laquelle il faudrait faire confiance et qu'il faut intégrer.

D'après ce schéma, il s'ensuit que l'évaluation (ou la "validation") n'est pas le stade ultime de la modélisation, comme on le voit souvent, mais un point essentiel de la boucle d'apprentissage.

2.8 LE QUESTIONNEMENT, POINT D'ENTREE DE LA MODELISATION

2.8.1 Le modèle scientifique repose sur une question

"Et, quoiqu'on en dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique... S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir de connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit".

Gaston Bachelard, La formation de l'esprit scientifique (1938)

Arrivé au terme de ce chapitre, il nous faut alors donner une définition du modèle. La plus citée, et d'ailleurs la moins controversée du terme modèle reste celle qu'en donne Marvin Minsky [Minsky, 1965] :

« To an observer B, an object A is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A ».*

Cette définition très simple permet de revenir sur des concepts clés de la modélisation en général, concepts qui sont souvent peu connus ou du moins peu pris en compte. A partir d'un domaine regroupant un ensemble d'entités et de phénomènes empiriques que l'on nomme le « domaine d'objet » ou le « système-cible », Minsky préconise de définir un cadre et une question que l'on se pose relativement à cet objet. La modélisation correspond alors à une activité d'abstraction compte tenu de la question posée. Alors pour rendre compte de certains phénomènes du système cible A et répondre à la question posée par B, il est « suffisant » d'étudier une abstraction de A : le modèle A* [Amblard et al., 2006].

La définition donnée par Minsky est très proche de celle qu'en propose René Thom dans [Thom, 1972] qui explique qu'on essaye de dominer des situations incertaines "à l'aide de la modélisation, c'est-à-dire en construisant un système matériel - ou mental- qui simule la situation naturelle du départ, à travers une certaine analogie. A ce point on formule une question sur la situation naturelle et, à travers l'analogie, on la transfère sur le modèle que l'on fait évoluer de manière à en obtenir une réponse" [ibid.]. Dans [Thom, 1978], l'auteur explique :

«Supposons qu'un être (ou une situation) extérieur(e) (X) présente un comportement énigmatique, et que nous nous posions à son sujet une (ou plusieurs) question(s) (\hat{Q}). Pour répondre à cette question, on va s'efforcer de «modéliser» (X) ; c'est-à-dire, on va construire un objet (réel ou abstrait) (M), considéré comme l'image, l'analogue de (X) : (M) sera dit le «modèle» de (X). Le modèle (M) est construit de telle manière que, dans l'analogie (A) de (X) vers (M), la question (\hat{Q}) posée sur (X) se traduit en une question pertinente (Q) sur (M) ; autrement dit, on peut poser la question (Q) au modèle (M) qui y répondra par une évolution naturelle conduisant à une réponse (R) : cela s'appelle « faire jouer » le modèle ; l'analogie (A), prise en sens inverse, permet alors de déduire de (R) une réponse (\hat{R}) valable pour (X). On comparera alors cette réponse aux données empiriques... ».

L'ensemble de ces opérations est résumé dans la figure suivante :

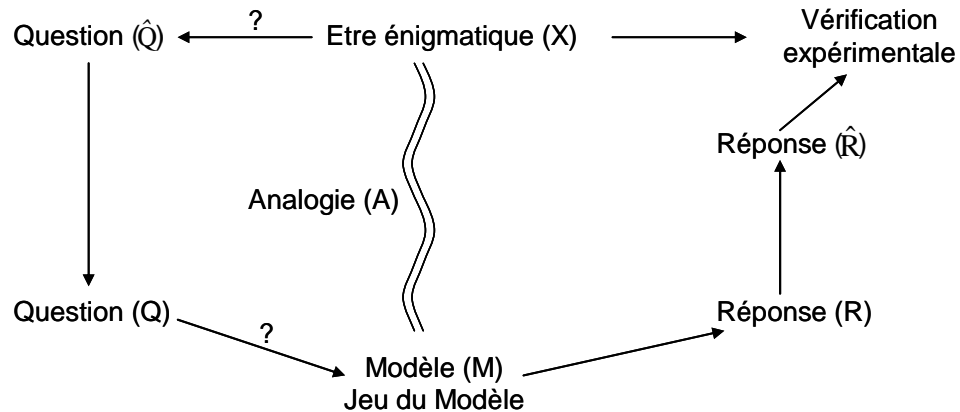


Figure 2-7 : Les relations entre un modèle et un système réel énigmatique, d'après [Thom, 1978].

Donc, avant même de commencer à concevoir un modèle, il est nécessaire de s'interroger sur "les questions pertinentes que je puis me poser au sujet de (X) ?" ou encore de se demander "de quoi dois-je m'étonner ?". On comprend ainsi, qu'au lieu de *répondre* à des questions, la modélisation ait maintenant pour rôle de *proposer* des questions. D'ailleurs, "un même (X) peut être modélisé d'une infinité de manières et c'est le type de questions (\hat{Q}) qui restreint le mode de modélisation à choisir". En d'autres termes, "c'est la demande (\hat{Q}) qui doit déterminer la construction du modèle (M), et non l'inverse" [ibid.]. E. Ramat utilise cette prédominance de la question pour expliquer le rôle même du modèle :

Il ne faut pas penser que le but est d'offrir le modèle le plus complet et le plus "beau". Il faut construire le meilleur modèle avec le formalisme le plus adapté pour répondre à la question posée. En effet, la modélisation n'est qu'un maillon dans la chaîne de la construction de la Connaissance du Monde : on ne fait pas de la modélisation pour la modélisation mais pour comprendre le fonctionnement du Monde et comprendre les impacts de certaines perturbations sur ce Monde. [Ramat, 2006]

Bien évidemment, les questions ne sont pas immanentes au système observé. Après avoir décrit ce système, la plus grande difficulté consiste justement à poser les bonnes questions. Le Moigne explique ainsi la différence entre l'analyste et le modélisateur :

L'analyste [...] est l'homme capable de comprendre le problème qui se pose. Le concepteur alors sera celui qui saura que les problèmes ne se posent pas tout seul, et qu'il doit être capable de les poser. Modéliser systématiquement, ce n'est pas résoudre un problème supposé bien posé (un objet) en cherchant un modèle déjà formulé dans le portefeuille accumulé par les sciences depuis des millénaires ; c'est d'abord chercher à formuler — à identifier — le problème que se posent les modélisateurs (un projet), en mettant en œuvre une procédure de modélisation dont les règles sont intelligibles et acceptées. [Le Moigne, 1977]

2.8.2 La modélisation a pour rôle de proposer des questions

L'image du modèle réduit parfait que j'ai exposée au paragraphe 2.2 doit être abandonnée. D'abord, il n'y a pas de modèle parfait car la réalité est toujours plus complexe qu'on ne l'imagine. De plus, l'idée répandue selon laquelle on pourrait poser tout type de questions à un modèle, doit être prise avec défiance. C'était d'ailleurs un peu l'idée à la base des systèmes experts. Mais comme on l'a vu, un modèle n'est pas neutre et un système observé peut être modélisé d'une infinité de manières.

Pour concevoir son modèle, le modélisateur doit donc énoncer les questions qu'il se pose au sujet de son objet d'étude. En effet, ce sont ces questions qui restreignent le mode de modélisation à choisir. Expliciter l'objectif du modèle est alors indispensable car il fournit un cadre pour toute la

description de celui-ci. Il faut aussi insister sur le fait que cette mise en perspective permet à ceux qui découvrent le modèle de comprendre pourquoi certains aspects du système étudié ont été ignorés [Grimm & Railsback, 2005]. Toutefois il faut le reconnaître, expliciter ses questions de recherche n'est pas un exercice trivial. Car à nouveau, comme l'exprime Gaston Bachelard, "les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique... S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir de connaissance scientifique".

Lors de la conception d'un modèle et pour aiguiller ce cheminement difficile, il est souvent intéressant de se projeter dans le futur en imaginant que son modèle est achevé. On peut alors s'interroger à nouveau sur l'objectif de ce travail et se demander par anticipation de quoi devrait-on s'étonner ?

La démarche est donc inverse à la conception naïve exprimée précédemment (à savoir créer par imitation un modèle réduit pour ensuite lui poser des questions) : la modélisation doit commencer à partir d'une question ou d'un ensemble restreint de questions qui fixent les objectifs du modèle.

2.9 CONCLUSION DU CHAPITRE

2.9.1 *Un modèle n'est pas neutre*

Au cours de ce chapitre, nous avons essayé de comprendre le statut du modèle pris dans un sens général. En particulier, deux rôles distincts se dégagent : l'un est prédictif quand l'autre est explicatif. Cependant la frontière qui les sépare n'est pas toujours très claire. Les SMA plus encore que les systèmes à équations s'inscrivent dans le domaine des modèles explicatifs. Car, malgré l'aspect temporel qui les caractérise, leur utilité première est bien de comprendre les conséquences de mécanismes supposés à l'œuvre dans un système, et non pas comme on l'entend parfois, de prédire l'évolution de ce système.

Evidemment, on voudra souvent mimer le système étudié en pensant naïvement en obtenir un modèle réduit tout à fait homothétique. Grâce à cet hypothétique jouet fabuleux qu'on aura conçu et mis au point pendant des années, on espère alors pouvoir lui poser tout type de question qu'on souhaiterait poser au système réel. Mais inmanquablement, se pose alors la question de la "validation" de ce simili monde.

Par ailleurs, il faut comprendre que cette vision de la modélisation est naïve et peut même être pernicieuse. Car elle présuppose que le modélisateur a conçu, objectivement et sans préjugé, une représentation neutre du système qu'il étudie, comme si une représentation du monde n'était qu'une simple projection de celui-ci dans son esprit. Or, il n'y a pas de vision neutre du monde.

La construction d'une représentation s'établit toujours sur la base de présupposés souvent implicites. Face à un système, un événement ou une situation, un observateur perçoit des éléments et des relations entre eux. Par divers mécanismes très complexes, il les catégorise de façon à structurer et à organiser l'ensemble. Il s'en construit sa propre représentation qu'il appellera la "réalité". Mais malgré les apparences, cette image du monde n'est pas une simple projection sur la rétine d'une réalité supposée objective. On l'appelle en général "le réel perçu" ou même "la réalité", généralisant par-là même cette sensation d'évidence. Mais c'est au contraire une représentation bien personnelle qui a été façonnée par notre histoire personnelle mais aussi et surtout par notre culture et notre langue. On peut donc supposer qu'il n'existe pas de conception neutre, mais seulement des représentations subjectives et parfois contradictoires.

La vision naïve de la modélisation peut être pernicieuse car le souci de l'objectivité, assorti à l'image du scientifique érudit qui s'appuie sur des outils mathématiques ou informatiques sophistiqués, est la porte ouverte à toutes sortes de manipulations bienveillantes ou malveillantes.

2.9.2 *La modélisation commence par des questions*

Le désir de concevoir un modèle comme une copie parfaite de la réalité doit donc être écarté. De plus, l'idée répandue selon laquelle on pourrait poser tout type de questions à un modèle, doit être prise avec défiance. En effet, avant de concevoir un modèle, il est nécessaire d'explicitier les questions que l'on se pose sur le système étudié. Celles-ci fournissent alors un cadre pour restreindre les dimensions du modèle. Elles permettent de faire comprendre pourquoi certains aspects ont été ignorés et d'autres non. Evidemment, la formulation de ces questions est un exercice ardu mais néanmoins décisif. Cette tâche peut être facilitée en imaginant que le modèle est achevé et en se demandant par anticipation de quoi devrait-on s'étonner.

Ainsi, contrairement à la conception naïve du modèle mimétique, la modélisation qui s'apparente véritablement un processus d'apprentissage, doit débiter à partir de questions qui fixent les objectifs du modèle.

2.9.3 *Générer des scénarios pour anticiper des futurs possibles*

A la question "pourquoi modéliser ?", plusieurs réponses semblent convenir. Personnellement, il me semble que le souci de comprendre reste le principal moteur. Evidemment, le processus de modélisation a aussi pour but d'anticiper des futurs possibles pour aider à choisir ; modéliser pour aider à la décision diront certains.

Toutefois l'anticipation n'est pas la prédiction. Cette dernière laisse supposer que l'avenir est déjà tout tracé, peut-être de façon obscure pour le profane, mais "déjà peint sur la toile" [Bergson, 1907]. Or un modèle n'est pas une boule de cristal et il me paraît indispensable d'éviter d'employer le terme prédiction. Prétendre prédire le futur reste en dehors du domaine de la science.

Anticiper, par contre, consiste à imaginer à l'avance le cours *possible* des événements et de présumer l'avenir. Ce dernier n'est pas déjà décidé mais reste une chose à faire. Nous pouvons anticiper, conjecturer, mais non rigoureusement prévoir. Telle une fiction, l'anticipation ou la prospection consiste alors à essayer d'explorer le champ des possibles. Concevoir des modèles maniables et à les projeter dans le futur permet d'imaginer des scénarios en testant des alternatives ou en poussant une logique jusqu'à ses conséquences extrêmes.

Chapitre 3

LES AVANTAGES DE LA MODELISATION MULTI-AGENT

"When I observed phenomena in the laboratory that I did not understand, I would also ask questions as if interrogating myself: "Why would I do that if I were a virus or a cancer cell, or the immune system" Before long, this internal dialogue became second nature to me; I found that my mind worked this way all the time."

[Salk, 1983, p. 7]

Si nous cherchons à comprendre comment fonctionne un système ou comment il peut évoluer, ou si nous essayons d'anticiper des futurs possibles en générant des scénarios, il s'avère que les modèles de simulation qui prennent en charge explicitement le temps constituent des outils précieux. Parmi ceux-ci, les SMA présentent de nombreux avantages en particulier pour traiter de l'organisation des éco-socio-systèmes.

3.1 LES GRANDES CATEGORIES DE MODELES DE SIMULATION

Eric Ramat dresse une classification des formalismes dédiés à la spécification de la dynamique des systèmes en fonction de trois critères : la spécification de variables continues ou discrètes, la représentation de l'espace continu ou discret et la présence du temps continu ou discret. La figure page suivante, extraite de [Ramat, 2006], présente cette classification.

Nous reviendrons aux chapitres 5 et 6 plus spécifiquement sur le rôle du temps et les façons de le représenter dans divers types de modèles de simulation. Car pour le moment, l'objet de ce chapitre est de décrire les avantages des modèles multi-agents vis-à-vis d'autres approches plus standards de la modélisation. On peut donc partir de cette classification proposée par E. Ramat pour présenter rapidement les divers types de modèles de simulation.

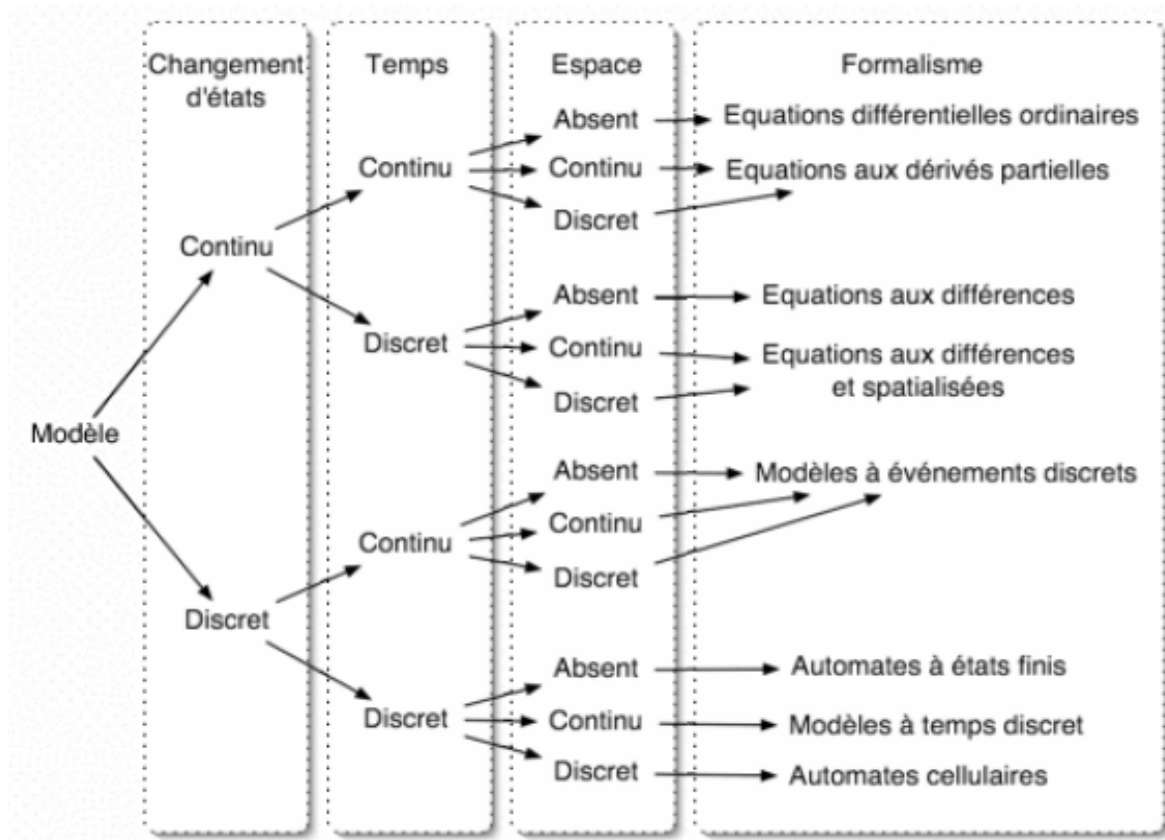


Figure 3-1 : Classification des formalismes selon l'aspect continu ou discret des variables, du temps et de l'espace, d'après [Ramat, 2006]

Cette classification laisse deviner deux grandes catégories d'outils conceptuels pour formaliser et concevoir des modèles de simulation : d'un côté le formalisme mathématique (la grande famille des modèles à équations) et de l'autre, le formalisme informatique (automates cellulaires et SMA). Au moment du choix des outils pour élaborer leur modèle, certains préfèrent opter pour les SMA en considérant qu'ils sont les mieux à même de traiter des interactions et de la spatialité. Mais, contrairement à certaines idées reçues, la prise en compte des interactions entre les entités d'un système n'est pas l'apanage des seuls SMA.

3.1.1 Modèles mathématiques et prise en compte des interactions

Les études démographiques et de dynamique des populations (cf. chap. 5) sont historiquement les premiers travaux dans le domaine de la modélisation. Elles proposent des techniques où le modèle tente de simuler l'évolution de la taille d'une population par des caractéristiques moyennées. Les modèles mathématiques sont alors classiquement écrits sous la forme d'équations différentielles (temps continu) ou d'équations récurrentes (temps discret). Quand plusieurs populations sont étudiées, on utilise alors des systèmes d'équations (différentielles ou récurrentes). L'exemple suivant montre un système d'équations différentielles où chaque ligne correspond à la variation de la taille d'une population a, b ou c ou autre :

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = f(a, b, c, \dots, t) \\ \frac{db}{dt} = g(a, b, c, \dots, t) \\ \dots \end{cases}$$

Pour illustrer de façon simple ces deux types de gestion du temps, le modèle de Verhulst [1838] (différentiel) et l'équation logistique (récurrente) sont présentés au chapitre 6. Par ailleurs, le

modèle de Volterra [Volterra, 1926], déjà mentionné au chapitre 1, est succinctement expliqué en annexe 1 (page 288). Ce modèle traite des relations qu'entretient une population de prédateurs avec ses proies. Il est si connu qu'il demeure une référence incontournable et il sera discuté à plusieurs moments de la thèse. La figure suivante présente le modèle mathématique et un résultat d'une simulation.

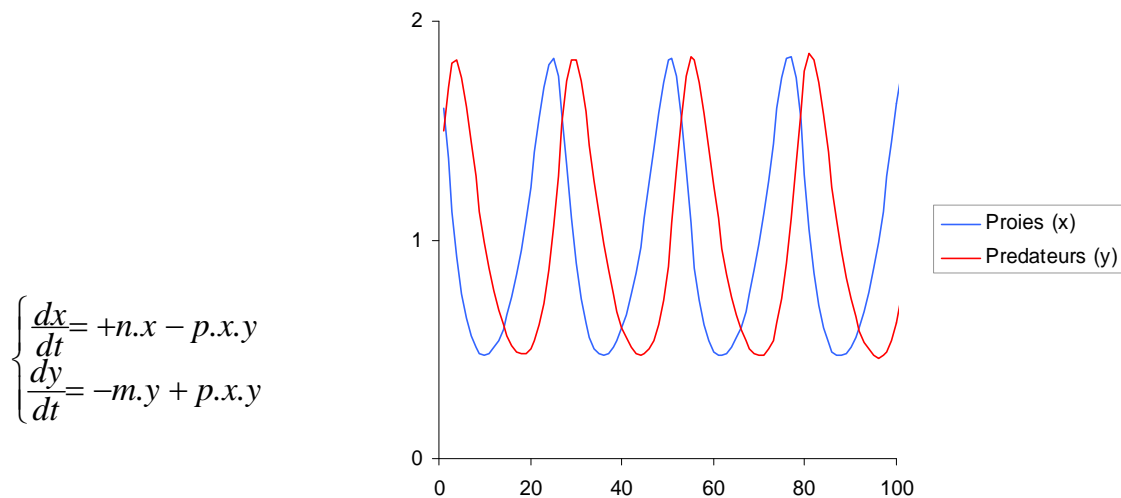


Figure 3-2 : Système d'équation différentiel du modèle de Volterra et évolutions temporaires des populations de proies et de prédateurs qui oscillent de façon endogène au modèle. (n est le taux de natalité des proies; m , le taux de mortalité des prédateurs ; le paramètre p représente l'efficacité de la prédation. Pour cette simulation particulière, $n=m=p=1$).

Malgré sa simplicité, le modèle proie-prédateur laisse apparaître des rythmes endogènes, liés uniquement aux interactions entre les deux populations. C'est un résultat important du point de vue biologique qui montre qu'en l'absence de toute perturbation extérieure, il peut arriver que des populations en interaction fluctuent grandement. C'est cette idée qui a orienté le travail de V. Volterra qui réfléchissait sur les raisons des fluctuations des populations de sardines et de requins en mer Adriatique :

Certainement, il existe des circonstances ambiantes périodiques comme celles, par exemple qui dépendent de la succession des saisons, et qui produisent des oscillations forcées ou de caractère externe, dans le nombre des individus des diverses espèces. A côté de ces actions périodiques externes qui ont été plus spécialement étudiées du côté statistique, n'y en a-t-il pas d'autres de caractère interne avec des périodes propres, indépendantes des causes externes et qui se superposent à celles-ci ?

Leçons sur la Théorie Mathématique de la Lutte pour la Vie. [Volterra, 1931]

Ainsi, il est faux de dire comme on l'entend parfois que les modèles mathématiques ne peuvent pas prendre en compte les interactions. Mais ici, ces interactions qui sont présentées par des variables d'une équation dans une autre (la variable x se trouve dans l'équation de dy par exemple), ne sont pas des interactions entre individus proies et prédateurs mais elles sont conceptualisées au niveau de chaque population d'animaux.

En effet, tous les modèles dont je viens de parler supposent que les individus sont interchangeables : c'est l'hypothèse d'interchangeabilité de deux individus pris au hasard dans une population. En ne considérant que la taille X d'une population, on ne s'intéresse pas à la situation spatio-temporelle de chaque entité mais on suppose que tous les individus contenus dans X sont équivalents.

D'autres modèles mathématiques dits orientés-individus ne traitent pas non plus (contrairement à leur appellation) des individus mais des distributions d'individus en classes d'âge. Ce sont des modèles matriciels de dynamique de populations, dont font partie les modèles de Leslie qui spécifient des taux de croissance, de reproduction et de survie différents selon l'âge des individus [Leslie, 1945].

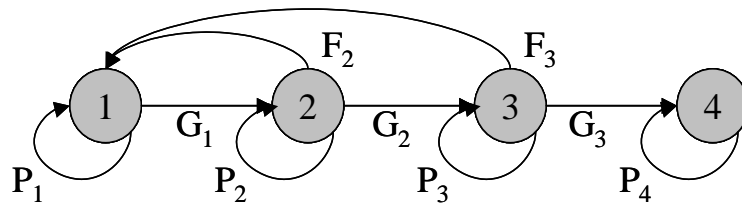


Figure 3-3 : Exemple de graphe de cycle de vie d'une population découpée en classes de taille. D'après [Charles-Bajard, 2004].

Dans l'exemple ci-dessus, l'intervalle de temps est l'année et les individus sont divisés en quatre classes : les jeunes de l'année, les juvéniles, les femelles matures, et les femelles âgées qui ne se reproduisent plus. D'un pas de temps au suivant, une femelle mature (classe 3) par exemple peut soit passer dans la classe suivante (4, femelle sans reproduction) avec une probabilité G_3 , soit rester dans la même classe avec une probabilité P_3 . Dans le même temps, elle peut créer un nouvel individu avec une probabilité F_3 . En fait, cette activité de reproduction est traduite par le modèle de la façon suivante : pendant un pas de temps, le stock des femelles matures (X_3) augmente d'une valeur égale à $P_3.X_3$ et il fait croître le stock des jeunes (1) de $F_3.X_3$ et celui des femelles âgées de $G_3.X_3$. La matrice du modèle correspondante s'écrit alors :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & F_2 & F_3 & 0 \\ G_1 & P_2 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & P_3 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 & P_4 \end{pmatrix}$$

Puisque la première classe dure un an comme le pas de temps, on a $P_1 = 0$. L'équation matricielle de ce modèle s'écrit alors : $\vec{N}_{t+1} = A.\vec{N}_t$ où le vecteur \vec{N}_t décrit la distribution de la population au temps t . On retombe donc sur une équation récurrente dont les variables sont des matrices.

Contrairement aux idées souvent répandues, les modèles mathématiques peuvent aussi traiter de l'hétérogénéité spatiale. Ainsi, [Angelis et al., 1979] utilisent les concepts du modèle de Lotka-Volterra pour introduire des modèles logistiques multi-sites : les phénomènes de prédation du modèle originel sont adaptés pour décrire des migrations d'une partie de la population d'un site vers un autre. Sur un principe équivalent, [Lebreton, 1996] adapte les modèles matriciels pour créer des matrices de Leslie multi-sites dans lesquels les classes présentées précédemment correspondent à des patches. On peut donc utiliser le formalisme standard des mathématiques pour étudier l'impact de l'hétérogénéité spatiale, ainsi que celui des déplacements, sur la stabilité d'un système de type proies-prédateurs [Auger & Poggiale, 1996], [Poggiale & Auger, 2004]¹⁸.

3.1.2 Modèles multi-agents et modèles individus-centrés

Qu'ils soient basés sur des systèmes d'équations aux dérivés ou d'équations récurrentes ou même qu'ils soient appelés orientés-individus, les modèles mathématiques font toujours l'hypothèse d'interchangeabilité des individus pris au hasard dans une population, une classe d'âge ou un groupe. Au sein de ce groupe, ils font l'hypothèse implicite que tous les individus sont identiques, ce qui semble être une supposition trop forte. Par ailleurs, étant donné que la localisation des individus n'est pas prise en compte (la spatialisation est au mieux réduite à la notion de sites ou patches), ils rajoutent l'hypothèse que chaque individu interagit de façon identique avec ses

¹⁸ Les auteurs étudient un système prédateur-proie dans un environnement divisé en seulement deux sites : l'un est un refuge pour les proies et l'autre contient des prédateurs. L'hétérogénéité spatiale est obtenue en supposant que les paramètres démographiques (taux de croissance et taux de mortalité) dépendent du site. Comme les déplacements sont supposés plus rapides que la croissance et que les processus de prédation, les auteurs prennent en compte deux échelles de temps différentes [Auger & Poggiale, 1996]. Mais avec deux sites, peut-on réellement parler d'hétérogénéité spatiale ?

congénères ou ceux d'autres populations. Comme l'explique [Ferber, 1995], les modèles mathématiques (ou modèles agrégés) s'attachent à décrire des variables se situant toutes au même niveau. Il n'est pas possible de relier la valeur d'une variable au niveau agrégé à des comportements individuels : "les niveaux d'analyse sont étanches" [ibid.]. En d'autres termes, les modèles agrégés peuvent décrire des populations qui interagissent (proies-prédateurs) sans décrire le comment.

Dans un modèle centré-individu par contre, cette hypothèse d'interchangeabilité et d'équivalence des individus n'est pas postulée. Un agent est principalement affecté par les conditions environnementales qui se trouvent dans son voisinage ainsi que par sa situation dans un réseau social. Les interactions qu'il entretient avec son environnement pris au sens général, sont localisées dans le temps et dans l'espace. Son histoire est différente des autres et il peut à ce titre influencer le cours des choses. Il n'est pas rare que le comportement d'un seul individu puisse entraîner des changements du système en entier. Ainsi, la variabilité inter-individuelle peut être à l'origine de phénomènes plus globaux.

En cherchant à reproduire le comportement des individus, les modèles individus-centrés, tels que les modèles multi-agents (aussi appelés IBMs en écologie, pour Individual-Based Models) permettent de suivre l'évolution de chaque agent et ses interactions avec les autres. L'approche individu-centrée permet alors d'étudier les phénomènes globaux d'un système en spécifiant uniquement les comportements individuels. A l'opposé des modèles mathématiques qui abordent la modélisation selon une approche dite "top-down", les modèles orientés-individus misent sur une démarche dite "bottom-up"¹⁹.

3.2 DEFINITIONS DES AGENTS ET DES SYSTEMES MULTI-AGENTS

La modélisation multi-agent permet de décrire un système en termes d'objets, d'agents et de relations plutôt que par des variables et des équations. Si les modèles mathématiques héritent d'une longue histoire qui a façonné la culture scientifique, les SMA sont bien plus récents et reposent sur une culture plus "populaire" ou du moins, plus accessible. Ce pouvoir descriptif offre la possibilité de représenter des artefacts d'individus évoluant et interagissant dans un environnement virtuel. Les SMA s'apparentent alors à une métaphore sociale à travers laquelle on cherche à donner à des agents les moyens de s'organiser. Cette accessibilité et cette expressivité procurent aux SMA leurs caractères si appréciés, du moins dans le domaine des ressources renouvelables.

En 1988, [Ferber, 1988] définissait les agents et les systèmes multi-agents de la façon suivante :

On appelle agent une entité physique ou virtuelle,

1. qui est capable d'agir dans un environnement,

2. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,

3. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),

4. qui possède des ressources propres,

5. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,

6. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),

7. qui possède des compétences et offre des services,

8. qui peut éventuellement se reproduire,

¹⁹ La thèse de C. Lett traite de façon plus détaillée des intérêts réciproques des modèles agrégés et des modèles individus-centrés dans le cadre des systèmes forestiers [Lett, 1999].

9. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

A la différence des objets, le concept d'agent est souvent associé aux capacités d'autonomie et de pro-activité. Sur cette base, Ferber définissait les SMA ainsi :

Un système multi-agent est composé de :

1. Un ensemble d'agents agissant et communiquant
2. Un mode d'organisation et de coordination
3. Un point de vue de l'observateur
4. Un environnement
5. Des objets passifs
6. Des agents
7. Un ensemble d'interactions
8. Des opérateurs pour la perception, la communication, la production, la consommation et la transformation de ces objets
9. Des opérateurs pour la mise à jour de l'environnement

Pour mieux visualiser ces définitions, [Ferber, 1995] propose un schéma qui résume bien les principaux concepts véhiculés :

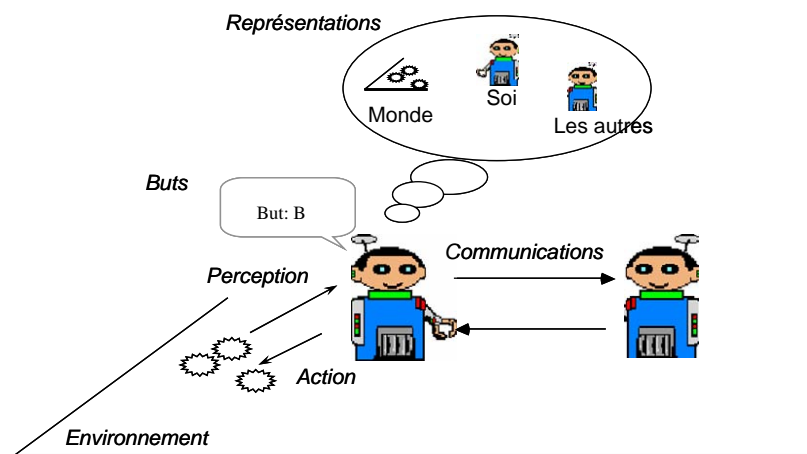
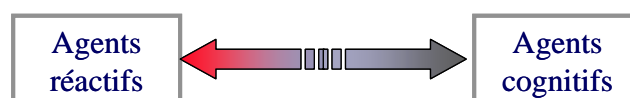


Figure 3-4 : "Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents", d'après [Ferber, 1995].

Evidemment, il existe des SMA purement communicants, sans environnement et sans objets inertes, mais aussi des agents non-cognitifs sans fonction de représentation (dans le sens d'une modélisation de leur environnement). Par ailleurs, il manque à ce schéma le ou les regards de l'observateur. Mais sa grande qualité, de mon point de vue, est de montrer les agents comme des entités stylisées sous forme de robots. Car pour présenter ce domaine de l'intelligence artificielle à des néophytes, il faut rapidement démystifier l'idée d'une "intelligence" qui s'apparenterait à celle des humains. On a d'ailleurs souvent classifié les SMA en fonction d'un gradient d'intelligence, des agents purement réactifs jusqu'aux agents cognitifs :



Mais restons réalistes : les capacités humaines et celles du monde vivant sont, de façon incommensurable, bien supérieures à celle d'une machine, même la plus évoluée. Les capacités cognitives d'un agent le dotent "d'une intelligence très artificielle !" [F. Laloe, comm. pers.].

A partir de la définition ci-dessus, on constate aisément que les recherches sur les SMA portent essentiellement sur les problèmes de coordinations entre agents. On les dérive en problèmes de contrôle et de communication. Cependant, nous verrons ultérieurement que ces questionnements touchent finalement au problème de *l'autonomie* (chap. 6).

3.3 SMA ET ORGANISATION

Nombreux sont ceux qui étudient, à travers le paradigme SMA, les notions d'organisation. Ainsi, Yves Demazeau insiste sur ce concept lorsqu'il propose une méthodologie de conception appelée "Voyelles" qu'il décompose en 4 axes : A (pour Agents), E (pour Environnement²⁰), I (pour Interactions) et O (pour Organisation) [Demazeau, 1995]. Ce dernier axe demeure un concept très important pour le domaine des SMA. L'organisation, qui reste un terme vague²¹, hérite des analogies de la sociologie. Maturana et Varela la définissent comme :

"the relations that define a system as a unity, and determine the dynamics of interaction and transformations which it may undergo as such a unity, constitute the organization of a system".
[Maturana & Varela, 1979]

Dans ce cadre, le modèle multi-agent comme métaphore sociale semble d'un grand intérêt. En particulier, l'articulation entre le niveau individuel et le niveau collectif permet d'aborder les changements d'échelle dont la prise en compte semble indispensable pour comprendre certains phénomènes. Si les modèles mathématiques montrent leurs limites pour aborder l'articulation entre des échelles différentes, la réalisation de mondes artificiels dans lesquels des agents évoluent et interagissent, ouvre des possibilités d'investigation bien supérieures. C'est pour cette raison que les SMA sont classés dans les "approches constructivistes"²².

Toute la puissance des SMA résulte de cette boucle : les agents agissent de manière autonome dans un espace contraint par la structure de la société dans laquelle ils évoluent, cette structure résultant elle-même des comportements de ces agents. On se trouve donc là dans une boucle de dépendance entre agents et société d'agent, entre niveaux micro et macro, entre individu et collectif qui se trouve finalement au cœur de la problématique des systèmes complexes dans les sciences humaines et sociales. [...] Ce n'est donc pas un hasard si les SMA apparaissent comme un outil majeur pour modéliser des sociétés. [Ferber, 2006]

Le schéma suivant, qui complète le graphe précédent, illustre cette articulation entre deux échelles:

²⁰ L'environnement est le milieu dans lequel les agents sont plongés. Dans la plupart des applications multi-agents, il implique généralement une dimension spatiale, mais d'autres environnements peuvent être considérés.

²¹ "Façon dont un ensemble est constitué en vue de son fonctionnement" Petit Robert.

²² A ne pas confondre avec le constructivisme (ou l'épistémologie constructiviste), courant de pensée initié par Jean Piaget (cf. chapitre précédent). A la différence de l'approche analytique d'un côté (qui étudie un système élément par élément) ou de l'approche systémique ou holistique (qui étudie le comportement global du système) de l'autre, l'approche constructiviste permet de construire le comportement global du système en ne s'intéressant qu'aux comportements des individus.

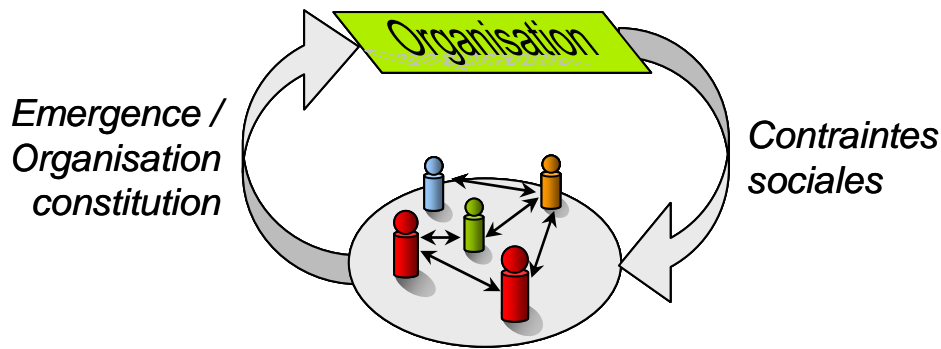


Figure 3-5 : La relation micro-macro dans les systèmes multi-agents, d'après [Ferber, 1995].

Ce graphe montre l'articulation entre le niveau des agents (micro) et le niveau de l'organisation (macro) et résume de façon claire et synthétique ce que sont les SMA. En s'appuyant d'avantage sur l'aspect comportemental des interrelations, [Ferber, 1994] développe le concept de *Kénétique*. Dans la lignée des travaux de [Maturana & Varela, 1994] sur les systèmes autopoïétiques (explications page 138), il considère qu'un système est une entité auto-organisatrice dont l'évolution est issue des comportements d'un ensemble de sous-unités en interactions. Il existe donc une dualité agents - organisation avec des régulations possibles à chaque niveau. Par ailleurs, l'articulation micro-macro est également indissociable de la notion d'*émergence*. C'est un concept essentiel des SMA qui nécessite une présentation plus détaillée (voir chapitre suivant).

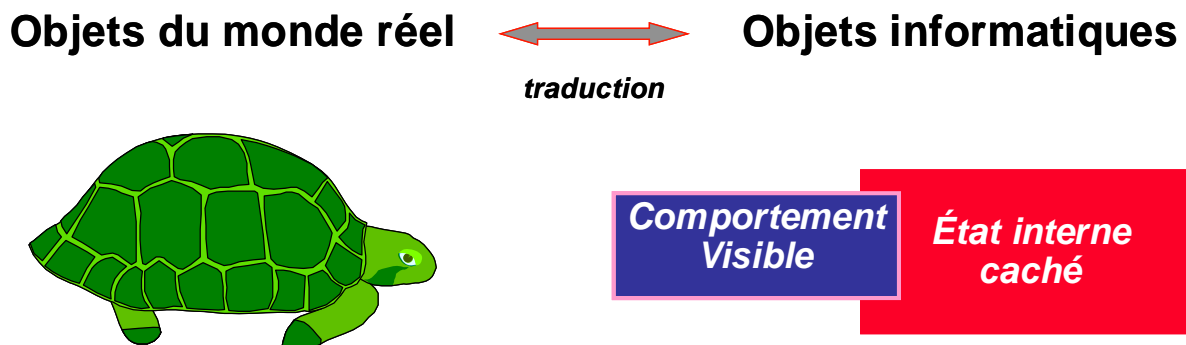
Les systèmes multi-agents sont habituellement rangés dans le domaine de l'IAD (intelligence artificielle distribuée). En effet, les SMA s'intéressent aux systèmes complexes où des entités artificielles ou naturelles interagissent pour produire des comportements collectifs. Mais au lieu de considérer uniquement les facultés cognitives d'un individu, l'IAD postule que l'intelligence "émerge" des interactions que les agents entretiennent entre eux et avec leur environnement. D'ailleurs, l'une des grandes sources d'inspiration des SMA a été l'étude des comportements d'animaux sociaux, particulièrement des sociétés d'insectes (fourmis, termites, abeilles), mais aussi d'autres animaux se déplaçant en formation tels que les bancs de poissons ou les meutes de loups en chasse. Ces études caractérisent ce qu'on appelle maintenant *l'intelligence collective*. Cette idée est également défendue par certains dans le domaine des sociétés humaines qui revendiquent l'idée d'organisation sociale non-dirigée [Lévy, 1994].

Pour certains, l'organisation désigne simplement la manière dont les éléments du système sont agencés et de la façon dont ils interagissent. Mais on peut également voir l'organisation comme une entité à part entière avec ses propres règles qui influence et dirige les comportements de ses composants (contraintes, règles conventionnelles, etc). En s'interrogeant sur les "croyances sociales", André Orléan [Orléan, 2004] définit le groupe ou l'objet social comme une entité abstraite dotée d'une autonomie propre par rapport aux individus qui la compose. Il prend l'exemple de la phrase suivante : "le marché croit que cette devise est sous évaluée". Evidemment, le marché financier en tant que tel n'a pas la faculté de croire. Mais il a une existence propre qui dépasse la simple composition des agents économiques : "du point de vue historique et social, les collectivités ne sont justement pas des collections d'individus, puisque leur identité n'est pas fixée par une liste d'individus" [Descombes, 1996, cité dans Phan, 2007]. Les marchés ne peuvent être réduits à l'ensemble des agents qui y participent à un moment donné mais ils perdurent malgré le flux d'agents qui en sortent ou qui y entrent. "Cette structure sociale complexe est ainsi porteuse d'un sens qui se maintient dans le temps indépendamment des agents qui y participent et qui dépasse leur dimension individuelle" [ibid.].

En fonction de la façon dont on perçoit une organisation, on pourra alors la représenter comme la résultante des interactions entre les entités ou si on lui reconnaît une certaine autonomie par rapport à ses constituants, on peut la modéliser comme un agent.²³

3.4 LES RELATIONS ENTRE LES NOTIONS D'AGENT ET D'OBJET

L'histoire des SMA est étroitement liée à celle de la modélisation *objet* et des langages orientés-objets. Simula 67, le premier langage objet, a été conçu dans les années 60 par les Norvégiens Ole-Johan Dahl et Kristen Nygaard. Comme son nom l'indique, Simula est destiné à faire de la simulation en représentant directement les entités du monde réel ayant une existence matérielle (tortue, voiture) ou immatérielle (sécurité sociale, compte bancaire) par une structure de donnée particulière qui associe en une même entité informatique un ensemble d'états et un ensemble de comportements.



Tous les grands concepts de la programmation orientée objet sont d'ores et déjà présents dans Simula qui inaugure les notions de classes, d'instanciation, de polymorphisme, d'encapsulation, etc.

A la différence des approches procédurales, la modélisation *objet* propose au concepteur de réifier les entités qu'il perçoit, de les organiser en décrivant leurs relations et d'étudier leurs évolutions sur des scénarios d'interactions.

Les inférences intellectuelles proposées qui consistent à regrouper et abstraire d'une part (pour définir concept ou classes), à spécialiser ou généraliser d'autre part (pour ordonner) sont à la fois naturelles et élégantes. La démarche itérative consistant à affiner progressivement les modèles obtenus en jouant sur les mécanismes suscités est aussi très souple et les interactions entre partenaires de la modélisation peuvent largement être prises en compte. Le fait que les classes d'un schéma soient organisées en hiérarchie de spécialisation / généralisations, en hiérarchie de composition / agrégation, et ceci, à plusieurs niveaux, est aussi parfaitement en adéquation avec les degrés de raffinement que les concepteurs peuvent souhaiter exploiter. [Libourel, 2003]

Ainsi, "la pensée objet" qui s'apparente plus à une culture implicite, permet de concevoir des modèles dans tous les domaines et de partager cette conception avec les disciplines impliquées sous forme d'un débat interdisciplinaire. Enfin, les principes de factorisation et de réutilisation dont l'approche se prévaut, permettent de définir des motifs de structuration et de comportements (des patrons) correspondant à des situations de modélisation récurrentes.

La pensée objet permet de concevoir un programme non plus comme une entité monolithique mais comme un ensemble d'entités élémentaires qui interagissent par l'intermédiaire d'envois de messages. Pratiquement, on pourrait utiliser les concepts initiaux avancés par les pionniers de la pensée objet pour définir les SMA : en génie logiciel "orienté-agent", le programme est vu comme

²³ Le chapitre 3 de la thèse d'Olivier Gutknecht traite de façon plus approfondie les relations de l'agent avec l'organisation [Gutknecht, 2001].

une société d'agents autonomes ayant chacun des compétences distinctes mais étant capable de coopérer et de s'auto-organiser.

Pourtant les objets ne sont pas réellement autonomes et Ferber déplore l'appauvrissement des idées initiales qui animaient les pionniers des concepts objets :

La notion d'objet en génie logiciel apportait tout un ensemble de concepts, de technologies et de méthodologies. Il est apparu alors que dans bon nombre de cas, les enjeux initiaux des objets, et notamment ici aussi le concept d'autonomie, n'avaient pas vraiment trouvé de réelles solutions technologiques. Les langages objets dont on dispose aujourd'hui ne sont que des pâles reflets des idées initiales qui avaient habité les pionniers du domaine, à savoir Alan Kay avec Smalltalk et Carl Hewitt avec Plasma. [Ferber, 2006]

Si ces déceptions sur les objets sont avérées, on peut penser qu'il en va autrement pour les agents qui sont censés être des entités autonomes, proactives et interagissantes. En d'autre terme, une tortue bien réelle s'avère plus indépendante qu'un objet informatique qui est souvent défini comme une entité devant offrir et exécuter des services. La traduction en agent tortue devrait exprimer cette indépendance. Or il s'avère que c'est rarement le cas comme le déplorent [Drogoul et al., 2003] qui se demandent "où sont les agents ?". Les auteurs expliquent que si ces propriétés d'agents sont monopolisées à un niveau métaphorique, dans les faits, elles ne sont pas traduites en propriétés computationnelles. "Les agents computationnels décrits en IAD ou en SMA ne sont tout simplement pas utilisés par la [simulation orientée-agent]" [ibid.].

En revenant sur la représentation imagée de la Figure 3-4, la notion d'agent paraît associer à l'aspect animé de l'entité par rapport aux objets qui s'apparentent plus à des entités passives et inanimées. Ainsi, [Treuil & Mullon, 1996] proposent de "rétablir la séparation entre la catégorie d'agent (animé), et la catégorie d'objet (inanimé), libre à chacun ensuite, selon son style et sa vision du domaine, de classer telle entité dans telle catégorie". Toutefois, l'évolution des différentes définitions des agents que l'on trouve dans la littérature me prête à penser que la notion d'autonomie demeure le point essentiel : l'autonomie apparaît comme une dimension indispensable pour caractériser les agents. Le chapitre 6 de la thèse est consacré à cette notion qui n'est finalement pas si simple.

3.5 LES SMA SONT PARTICULIEREMENT ADAPTES A L'AIDE A LA GESTION DES RESSOURCES RENOUVELABLES

3.5.1 Aborder la complexité par une démarche de modélisation systémique

Le réductionnisme est une démarche cartésienne qui cherche à comprendre le fonctionnement d'un objet à partir d'une analyse de ses éléments constitutants. En décomposant un système, elle cherche à en déduire ses propriétés à partir de celles de ses composants. Elle vise à réduire la nature complexe des choses en une somme de principes fondamentaux. A l'opposé, le holisme est un système de pensée qui consiste à considérer les phénomènes comme des totalités. Selon ce point de vue, les caractéristiques d'un être ou d'un système ne peuvent être connues qu'en les considérant dans leur totalité et non pas en étudiant chaque partie séparément; leurs propriétés ne sont pas uniquement déductibles de celles de leurs constituants. L'expression consacrée est alors « Le tout est plus que la somme de ses parties ». Dans son "Introduction à la Cybernétique", Ross Ashby critique le réductionnisme en ces termes :

"Aujourd'hui la science se trouve en quelque sorte sur une ligne de partage. Pendant deux siècles elle a étudié des systèmes intrinsèquement simples... Le fait qu'un dogme comme 'faire varier les facteurs un par un' ait pu être admis pendant un siècle, montre que l'objet des recherches scientifiques était dans une large mesure les systèmes qu'autorisait justement cette méthode, car une telle méthode est souvent totalement impropre à l'étude des systèmes complexes... Jusqu'à une époque récente, la science a eu tendance à concentrer son attention sur les systèmes simples et, notamment, sur les systèmes réductibles par l'analyse" [Ashby, 1956].

Ludwig Von Bertalanffy, considéré comme le fondateur de la systémique, affirme cette position plus globalisante. Dans [Von Bertalanffy, 1968], il écrit à ce sujet que "la tendance à analyser les systèmes comme un tout plutôt que comme des agrégations de parties est compatible avec la tendance de la science contemporaine à ne plus isoler les phénomènes dans des contextes étroitement confinés, à ne plus décortiquer les interactions avant de les examiner, à regarder des « tranches de nature » de plus en plus larges".

Par ailleurs la connaissance d'un système doit aussi passer par l'étude des interactions avec l'environnement, puisque environnement et systèmes s'influencent mutuellement. A ce sujet [Watzlawick et al., 1975] expliquent qu' "un phénomène demeure incompréhensible tant que le champ d'observation n'est pas suffisamment large pour qu'y soit inclus le contexte dans lequel ledit phénomène se produit". Ainsi l'étude et la compréhension d'un système ne peut être étudié sans tenir compte de l'environnement au sein duquel il se trouve. De nombreux géographes se reconnaissent dans ce principe qui consiste à prendre de la hauteur pour mieux appréhender un système en décrivant les flux qui le traversent.

Entre les tenants du holisme et ceux du réductionnisme, on assiste généralement à des querelles irréductibles. Néanmoins, certains auteurs (Humberto Maturana, Edgar Morin et bien d'autres) tentent de dépasser ce clivage en proposant une approche systémique de la complexité. Ils visent à faire la synthèse entre ces deux courants de pensée en adoptant une "pensée complexe". Edgar Morin explique que la "pensée complexe" n'est ni holiste, ni réductionniste :

"Il ne s'agit pas d'opposer un holisme global en creux au réductionnisme mutilant; il s'agit de rattacher les parties à la totalité. Il s'agit d'articuler les principes d'ordre et de désordre, de séparation et de jonction, d'autonomie et de dépendance, qui sont en dialogique (complémentaires, concurrents et antagonistes) au sein de l'univers." [Morin, 1990]

On caractérise souvent un système complexe comme un système composé de nombreux éléments différenciés interagissant entre eux. Mais "ce n'est pas tant la multiplicité des composants, ni même la diversité de leurs interrelations, qui caractérisent la complexité d'un système" [Le Moigne, 1977], car un dénombrement combinatoire peut permettre de décrire tous les comportements possibles de ce système. Par contre, un système complexe se caractérise par l'émergence au niveau global de propriétés non observables au niveau des éléments constitutifs, et par une dynamique de fonctionnement global non prévisible à partir de l'observation et de l'analyse des interactions élémentaires.

Les physiciens ont, les premiers, étudié les propriétés des systèmes complexes à travers les réseaux d'automates. Ils ont observé le comportement global d'un système composé d'entités en interaction et au fonctionnement extrêmement simple : l'état d'un automate dépend de l'état des automates auxquels il est connecté [Weisbuch, 1989]. Plusieurs auteurs (dont le médiatique [Wolfram, 2002]) ont montré qu'un réseau d'automates peut exhiber plusieurs types de comportements que l'on catégorise en classes d'universalité : systèmes stables, cycliques, désordonnés et chaotiques. Dans le cas d'un comportement chaotique, le fonctionnement du système complexe est imprévisible : il ne se stabilise pas sur un état ou un autre. Cependant il n'est pas désordonné car des agencements particuliers s'installent temporairement et se succèdent au gré de quelques configurations locales particulières. En considérant cette classe d'universalité aux comportements si particuliers, Christopher Langton transfère par analogie ces concepts des

réseaux d'automates dans le champ des systèmes naturels et sociaux. Il propose d'étudier l'évolution des espèces à travers cette métaphore en considérant que la vie n'apparaît qu'au "bord du chaos" [Langton, 1990], [Lewin, 1994].

L'approche systémique considère qu'un système complexe possède d'autant plus de capacités à s'adapter aux modifications de son environnement, qu'il dispose d'un certain degré de "variété", au sens de la diversité des réponses adaptatives qu'il possède. Ce principe est connu sous le nom de la *loi de la variété requise* de Ross Ashby.

C'est en vertu de la proposition énoncée par Edgar Morin concernant la "pensée complexe" que les SMA peuvent jouer un rôle non négligeable pour l'étude et la compréhension d'un système. En permettant de recomposer une dynamique globale à partir des comportements et des interactions des entités d'un système, ils permettent d'examiner l'articulation entre les niveaux d'organisation. En d'autres termes, ces outils autorisent la synthèse entre l'approche standard des réductionnistes et celle plus originale des holistes.

3.5.2 Importance de l'espace et des interactions en écologie

Comme il a été dit au début du chapitre, les modèles mathématiques permettent de décrire des interactions entre des variables. On peut également utiliser ce formalisme pour étudier l'impact de phénomènes spatialisés. Mais la prise en compte des interactions et de la spatialité est souvent sommaire. Or, les écosystèmes dévoilent des interactions bien plus sophistiquées qui peuvent conduire à des comportements plus complexes de ces systèmes. Car, comme le souligne [Ramade, 1995], "l'écologie est la science des interactions". En effet, un organisme est principalement affecté par les organismes et les conditions environnementales qui se trouvent dans son voisinage.

Pour illustrer ceci, prenons l'exemple de l'espace dont la prise en compte dans l'histoire de l'écologie a été progressive. Les études expérimentales de dynamique des populations menées par Gause et modélisées par Lotka et Volterra, ont montré dans un premier temps le rôle de la compétition. Ils en ont déduit le "principe d'exclusion compétitive" [Gause, 1934; Hardin, 1960]. Ce principe postule que deux ou plusieurs espèces occupant la même niche écologique c'est-à-dire utilisant des ressources identiques, ne peuvent coexister dans un environnement stable : l'espèce la plus apte à utiliser les ressources élimine les autres. Longtemps les études sur l'organisation des peuplements ont porté leur attention essentiellement sur le rôle des interactions biotiques et principalement de la compétition interspécifique (Hutchinson et MacArthur). Mais depuis, plusieurs écologues ont tempéré cette vision de la compétition. Car le principe de Gause, pourtant confirmé par des expériences en laboratoire [Gause, 1935], n'apparaît plus aussi valide lorsque le milieu est affecté par des perturbations aléatoires ou lorsque des prédateurs sont introduits dans le système. De plus, beaucoup de systèmes écologiques dévoilent que de très nombreuses espèces peuvent coexister. Les expériences de Huffaker puis de Pimentel [1965] montrent que ce phénomène d'exclusion compétitive disparaît et que des espèces proches coexistent lorsque le milieu est hétérogène et compartimenté. La structure spatiale peut donc favoriser la survie d'une espèce moins compétitive, mettant à mal le principe de Gause. "A l'heure actuelle, la compétition redevient un facteur parmi d'autre et la variabilité spatiale et temporelle se voit rétablir progressivement ses droits. Il convient à présent d'étudier comment la variabilité externe [hétérogénéité spatiale et variabilité temporelle] s'insère dans l'organisation et le fonctionnement des peuplements, depuis les guildes d'espèces apparentées exploitant localement un même type de ressources jusqu'à des communautés reliant les espèces de groupes taxonomiques et de niveaux trophiques distincts" [Barbault, 1992].

Depuis quelques années, les recherches en écologie mettent donc l'accent sur l'importance de l'hétérogénéité spatiale pour rendre compte de la structure des écosystèmes. La prise en compte, même de manière simple, de cette hétérogénéité enrichit considérablement les résultats des modèles [Goreaud, 2000]. Il s'avère alors que les SMA ont un rôle essentiel à jouer.

Toujours dans le domaine de l'écologie, Volker Grimm présente d'autres raisons d'utiliser les SMA. Dans [Grimm, 1999], l'auteur fait le point sur dix ans de modélisation multi-agent dans ce domaine. En partant du constat qu'en physique, il n'est pas besoin de modéliser les atomes pour étudier les propriétés de la matière, il montre les avantages et les inconvénients d'une telle approche. Il compare les IBMs à la modélisation standard en écologie mais aussi à d'autres approches également appelées individu-centrées et qui ne sont pas pour autant fondamentalement distinctes des modèles classiques. En effet, ces IOMs (pour individual-oriented models) peuvent traiter, par exemple, de la distribution des individus en classes d'âge (voir début du chapitre) pour décrire la structure et l'évolution d'une population, sans prendre en compte véritablement les individus mais uniquement leurs caractéristiques moyennes. En reconnaissant un continuum depuis les modèles à variables d'état jusqu'aux modèles purement IBM, [Uchmanski & Grimm, 1996] énoncent quatre critères pour distinguer un IBM :

- Prise en compte explicite du cycle de vie des individus, plus élaboré que la simple identification de taux de croissance et de mortalité.
- Présence de ressources dont les dynamiques reflètent d'autres facteurs que la traditionnelle "capacité de charge" qui reste un concept au niveau de la population,
- La taille de la population est un nombre entier (la densité a été introduite dans les modèles écologiques comme des variables d'état pour des raisons pratiques de mathématique. Cf. chap. 5.2.1).
- Variabilité entre les individus d'une même classe d'âge. Ces différences ne doivent pas être déterminées au préalable par des données statistiques, mais elles doivent apparaître au cours de la simulation du fait de compétitions localisées entre certains individus.

Sans nécessairement adhérer complètement à tous ces critères, on peut reconnaître que la spécificité des IBMs repose sur la variabilité entre individus, elle-même fondée sur la prise en compte d'interactions ponctuelles et localisées. Avec le recul et vis-à-vis des attentes qu'on en espérait, Volker Grimm considère que la modélisation individu-centrée n'a pas suffisamment enrichi l'écologie [Grimm, 1999] [Grimm & Railsback, 2005]. Et cela pour trois raisons :

- de nombreux IBMs ont été développés pour des espèces spécifiques sans essayer de généraliser les résultats,
- beaucoup d'IBMs sont plutôt complexes mais manquent de techniques spécifiques pour traiter cette complexité,
- ils sont trop élaborés pour être décrit complètement dans un seul article, ce qui rend incomplète la communication avec la communauté scientifique.

On peut noter la contradiction apparente de ces raisons avec les critères précédemment énoncés. Néanmoins, si les SMA parvenaient à relever de tels défis, ils pourraient conduire à une vision fondamentalement nouvelle de l'écologie que les auteurs appellent IBE (pour Individual-Based Ecology) :

All individuals follow the same master plan: seeking fitness. Individuals must continually decide—in the literal or the more metaphorical sense—what to do next, and these decisions are based on the individual's internal models of the world. It seems reasonable to believe that individuals of many types have similar internal models and traits that are based on fitness seeking; and complexity science teaches us that individuals with identical adaptive traits but their own unique states, experiences, and environments can produce an infinite variety of system dynamics. Coherent and predictive theories of these traits will provide an important key to understanding ecological phenomena in general [ibid.]

3.5.3 Coupler les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales pour la gestion des ressources renouvelables

3.5.3.1 Les modèles standards de l'agronomie

Pour évaluer la production d'une plante, d'une parcelle ou d'une exploitation, les agronomes utilisent fréquemment des modèles bio-physiques de croissance des ressources. En fonction de l'échelle à laquelle ils travaillent, ils obtiennent une estimation de la production sous les hypothèses de stabilité et de continuité des phénomènes avoisinants. En particulier, les changements de décision des exploitants ne sont pas pris en compte dans ces modèles. Ils étudient donc la croissance végétale en faisant varier un paramètre bio-physique à la fois pour pouvoir interpréter les résultats de la manipulation. D'où la formule consacrée « toute chose égale par ailleurs ».

Les agronomes utilisent également les outils de la programmation linéaire pour estimer la meilleure solution qui s'offre à un paysan pour tirer le meilleur profit de son exploitation. La programmation linéaire est un domaine central de l'optimisation où toutes les contraintes sont considérées linéaires²⁴.

Ces méthodes qui se rattachent au domaine de la recherche opérationnelle, facilitent l'aide à la décision pour résoudre des problèmes d'optimisation. Elles peuvent aider un décideur lorsque celui-ci est confronté à un problème combinatoire ou de concurrence. Pour ce type de problèmes, étant donné qu'une simple énumération des solutions s'avère rapidement impossible (explosion combinatoire), des techniques de type heuristique doivent être ajoutées pour trouver des solutions acceptables par une énumération partielle.

3.5.3.2 Dynamiques loin de l'équilibre

Sans postuler d'hypothèses d'équilibre et d'optimisation pour formaliser des situations de concurrence ou d'interaction, d'autres types de modèles permettent d'aborder la gestion de ressources renouvelables, en intégrant différemment les dimensions écologiques et sociales dans leurs dynamiques et dans leurs interactions. Dans ce cadre, nous nous intéressons tout particulièrement aux méthodes qui permettent la prise en compte des règles collectives régissant l'accès aux ressources. Nous cherchons à étudier la viabilité du système d'interactions entre dynamiques écologiques et dynamiques sociales à travers les règles et institutions qu'une société se donne et fait fonctionner [Bousquet et al, 1996].

Or ces systèmes aux dynamiques complexes et aux nombreuses interactions ne se trouvent quasiment jamais à l'équilibre. Ce sont des systèmes ouverts qui réagissent constamment à des influences externes (politiques publiques, aléas climatiques, fluctuation des prix, flux de populations, flux de gènes, etc.) mais aussi à des modifications endogènes (changements de

²⁴ Exemple : Considérons un agriculteur qui possède des terres, de superficie égale à H hectares, dans lesquelles il peut planter du blé et du maïs. L'agriculteur possède une quantité E d'engrais et I d'insecticide. Le blé nécessite une quantité E_b d'engrais par hectare et I_b d'insecticide par hectare. Les quantités correspondantes pour le maïs sont notées E_m et I_m . Si P_b est le prix de vente du blé et P_m celui du maïs, on cherche alors x_b et x_m le nombre d'hectares à planter en blé et en maïs. Le nombre optimal d'hectares à planter en blé et en maïs peut être exprimé comme un programme linéaire:

Fonction à maximiser: Revenu net = $P_b \cdot x_b + P_m \cdot x_m$ (maximiser le revenu net), sous les contraintes :

a) $x_b + x_m \leq H$ (borne sur le nombre total d'hectares)

b) $E_b \cdot x_b + E_m \cdot x_m \leq E$ (borne sur la quantité d'engrais)

c) $I_b \cdot x_b + I_m \cdot x_m \leq I$ (borne sur la quantité d'insecticide)

(d'après wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_lin%C3%A9aire)

stratégies de production, changement d'utilisation des sols, etc). Aussi, pour étudier et modéliser ces systèmes, "les chercheurs [doivent] délaissier l'hégémonique concept d'équilibre pour s'intéresser à la dynamique des interactions sociétés-ressources" [Bousquet, 2001].

3.5.3.3 Vers une approche transdisciplinaire de la modélisation

Les problématiques des agronomes ont évolué au cours des années quatre-vingts. Il a fallu en particulier aborder les problèmes de gestion de ressources en prenant en compte à la fois les dimensions économiques et bio-physiques sans oublier la dimension sociale. Cette prise en compte s'est souvent traduite par des couplages de modèles. Une forme de couplage consiste alors à créer des communications entre les modèles bio-physiques et économiques qui s'échangent des données. Mais le principal ennui de cette technique est d'obtenir des systèmes trop complexes (des usines à gaz) avec de problèmes difficiles de gestion du temps. Par ailleurs, on peut percevoir cette façon de procéder plutôt comme une juxtaposition de disciplines et non pas comme une véritable approche interdisciplinaire.

En effet l'interdisciplinarité requiert l'intégration de savoirs scientifiques multidisciplinaires, pour porter un regard neuf sur les éco-socio-systèmes. Pour aborder ces couplages de dimensions, il paraît préférable de choisir une démarche plus intégrée qui prenne en compte simultanément les différentes disciplines, non pas comme une juxtaposition de celles-ci mais par la mise en place d'un dialogue transdisciplinaire. La modélisation est alors perçue comme l'articulation de ces dimensions en un même outil. Elle permet de redéfinir les enjeux en construisant un modèle des ressources *et* de la société qui cherche à répondre à une question pertinente.

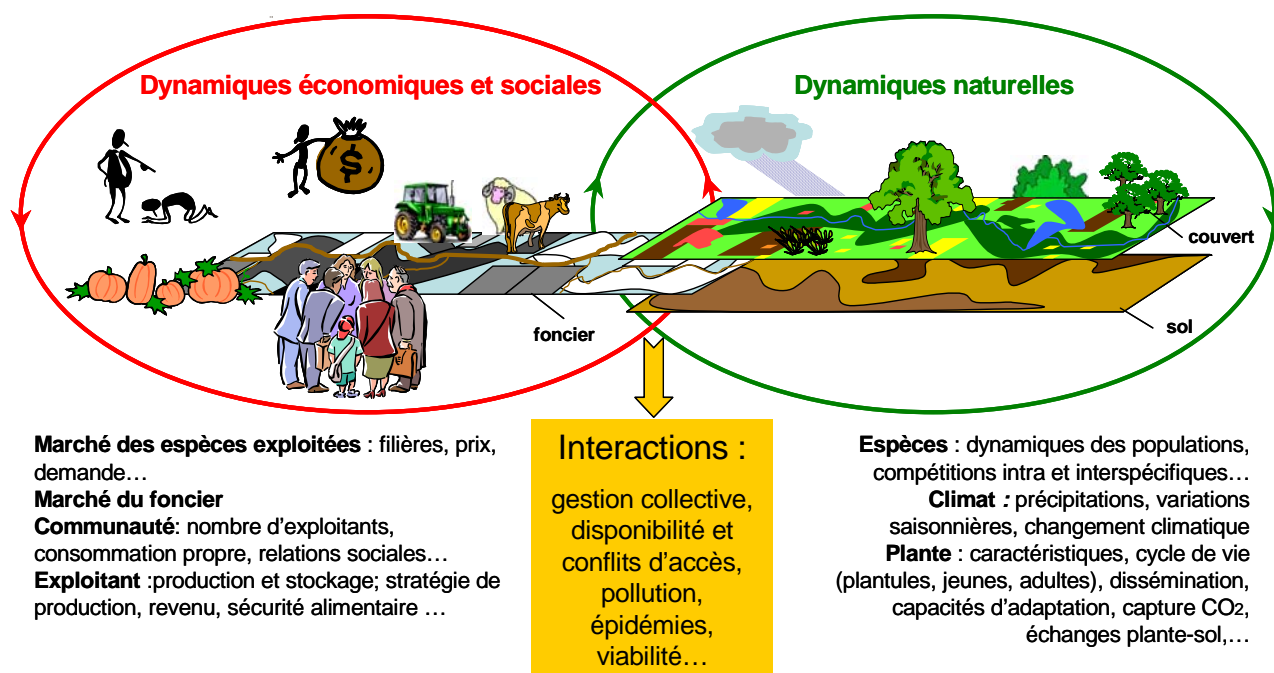


Figure 3-6 : Modéliser les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales. Dans le domaine de la gestion des ressources renouvelables, la prise en compte des interactions entre les dynamiques agraires et les dynamiques d'usage des ressources est primordiale. La modélisation est un moyen de comprendre les interactions entre ces deux dynamiques.

La modélisation multi-agent semble pertinente pour aborder la représentation conjointe de dynamiques écologiques et sociales dans un même outil qui autorise une démarche exploratoire. En intégrant des sciences biophysiques pour comprendre les dynamiques des ressources mais aussi des sciences humaines et sociales, on cherche à mieux comprendre les pratiques d'acteurs, leur coordination, ainsi que les dynamiques économiques, politiques et sociales.

Dans [Parker et al., 2003], les auteurs procèdent à une revue des modèles traitant des changements des couverts : LUCC (Land-Use and Land-Cover Change [Lambin & Geist, 2006]). Après avoir

énuméré un certain nombre d'approche, des modèles à base d'équation aux automates cellulaires en passant par les techniques statistiques et les systèmes experts, les auteurs abordent les SMA qui selon eux, fournissent une meilleure flexibilité pour traiter de ce type de problèmes.

[Parunak et al. 1998] comparent les différentes approches de la modélisation et relèvent les forces et les faiblesses relatives de chacune. Ils concluent que : *"...agent-based modeling is most appropriate for domains characterized by a high degree of localization and distribution and dominated by discrete decision. Equation-based modeling is most naturally applied to systems that can be modeled centrally, and in which the dynamics are dominated by physical laws rather than information processing."*

Dans ce contexte transdisciplinaire, un autre avantage des SMA tient au fait qu'ils sont compréhensibles par tous (scientifiques, décideurs et acteurs du développement). Ils peuvent ainsi s'intégrer dans des démarches participatives pour accompagner des décisions collectives.

3.6 COMMOD : LA MODELISATION COMME OBJET DE MEDIATION

"Il faut bien reconnaître que, sur bien des points, les paysans savent mieux l'économie politique que les économistes et les gouvernants".

Léon Walras

"Les chercheurs peuvent faire une chose plus nouvelle, plus difficile : favoriser l'apparition des conditions organisationnelles de la production collective de l'intention d'inventer un projet politique et, deuxièmement, les conditions organisationnelles de la réussite de l'invention d'un tel projet politique, qui sera évidemment un projet collectif"

P. Bourdieu "Pour un savoir engagé". Le Monde Diplomatique, fév. 2002

3.6.1 De l'aide à la décision pour piloter un système...

Dans le chapitre précédent, la question de savoir "pourquoi modéliser ?" était posée. Si la vision naïve sur le rôle des modèles considère qu'ils servent à prédire, beaucoup pensent plutôt à un outil prospectif pour dégager "le champ des possibles". Ainsi, dans une large mesure, le modèle est considéré comme un outil d'aide à la décision.

En cherchant à démystifier le modèle macroéconomique standard²⁵, [Boussard et al., 2005] expliquent que de tels modèles, si monstrueux²⁶ soient-ils, "sont même utilisés par les décideurs politiques pour engager l'avenir de l'Humanité". Evidemment, ces modèles ne sont pas perçus par les décideurs comme des boules de cristal fournissant des prédictions exactes. Car prétendre prévoir les chiffres mondiaux futurs "pour dans dix ans relève de la gageur, peut-être de l'escroquerie intellectuelle" [Ibid.]. Mais ils donnent des ordres de grandeurs qui appuient la décision. Pour ces auteurs, "ces modèles présentent au moins l'avantage de permettre l'examen d'hypothèses qui sont toutes cohérentes entre elles [...]. Les modèles de ce genre peuvent servir de béquilles pour le raisonnement" [ibid.]. Mais les auteurs reconnaissent un mauvais usage des modèles qui consiste à prendre au pied de la lettre ceux qui vont dans le sens que l'on souhaite. Les résultats du modèle standard par exemple, "jouent un rôle important dans l'entreprise qui consiste à persuader le public que « la libéralisation est une bonne chose »" [ibid.].

²⁵ Le modèle dit standard est un modèle international du GTAP (Global Trade Analysis Project) pour l'étude du développement durable et de la distribution des revenus. Ses résultats encouragent la libéralisation de l'agriculture mondiale.

²⁶ Alimenté par une base de données gigantesque du GTAP, le modèle standard peut contenir jusqu'à 300.000 équations mathématiques !

Il faut donc rester très circonspect quant à cette notion d'aide à la décision. Car le danger est grand de manipuler les opinions. Le commanditaire d'une modélisation peut toujours s'appuyer sur les résultats du modèle quand ceux-ci vont dans la direction qu'il souhaite prendre ou à l'opposé, en critiquer les faiblesses lorsque les résultats sont en contradiction avec une décision qu'il a déjà prise.

3.6.2 ... à l'accompagnement du processus de décision

3.6.2.1 Echec de la méthode standard du décideur isolé pour gérer des ressources renouvelables

Dans le cadre de la gestion des ressources renouvelables, la décision est rarement le résultat d'un seul décideur mais plutôt la conséquence d'interactions entre plusieurs acteurs [Weber, 1995]. Par ailleurs, [Ferber & Guérin, 2003] considèrent que "dans le domaine des sciences sociales, le processus de modélisation n'est pas neutre car il porte sur des personnes et donc sur des individus doués de capacités, eux aussi, de représentation". Dans la lignée de la pensée de Maturana et Varela, ils expliquent que "le modélisateur, tout en croyant s'abstraire du monde par le biais de son modèle, fait partie du Kosmos et est donc soumis, lui aussi, aux représentations des autres personnes et en particulier de ceux qu'il modélise. De ce fait, le chercheur fait partie de la boucle sociale et ne peut se distinguer. La tentation est grande, et cette tentation est valable pour chacun de nous, de penser qu'il est possible de s'abstraire du contexte et d'évaluer quelque chose indépendamment de nous" [ibid.]. Le souci de neutralité que je désapprouvais au chapitre précédent, s'avère encore plus suspect lorsque l'on s'intéresse aux dynamiques sociales et à la modélisation des comportements humains.

Alors comment arriver à prendre des décisions mettant en œuvre des êtres humains dont les représentations seront nécessairement différentes de celles du décideur ? Comment se sortir du piège éternel des projections ? Car les décisions sont fréquemment "le résultat d'un processus d'interaction entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et des « poids » différents dans la négociation" [Weber et Bailly, 1993].

Une solution réside dans une autre forme de simulation dans laquelle les acteurs se mettent en situation et agissent en jouant leur propre rôle ou en prenant celui des autres et en tentant de mieux prendre en considération le point de vue et les motivations de chacun. C'est l'objet de la démarche ComMod.

3.6.2.2 ComMod : la modélisation d'accompagnement

ComMod (pour Companion Modelling en anglais) est une démarche qui cherche à accompagner des évolutions collectives de gestion des ressources renouvelables. À travers la modélisation, elle aborde les thèmes qui touchent à la propriété commune, à la coordination entre acteurs et aux processus collectifs de décision. Elle vise à l'élaboration de représentations partagées par les acteurs qui agissent et interagissent au sein d'un territoire. Face à de tels systèmes, complexes et dynamiques, objets d'enjeux et d'actions multiples de la part des acteurs, ComMod permet dans la mesure du possible d'explicitier les points de vue différents et les critères subjectifs de chacun. Pour cela, ComMod propose de coupler la modélisation multi-agent avec des jeux de rôles (JdR) pour comprendre et partager des connaissances. Le recours à la simulation multi-agent et aux JdR est un moyen de prendre en considération la complexité des systèmes étudiés et d'explorer des trajectoires évolutives.

L'objectif de ComMod est double :

1) Le premier objectif est d'aborder et de comprendre des environnements complexes en situation d'incertitude, c'est-à-dire :

- enrichir les connaissances sur un enjeu de développement,
- mieux comprendre la place et le rôle des acteurs dans ces processus,

- favoriser l'échange et la reconnaissance mutuelle des points de vue des acteurs,
- co-construire des indicateurs qui sont pertinents pour tous.

2) Grâce aux aspects ludiques de la démarche, le deuxième objectif est d'aider à la prise de décision collective, c'est-à-dire :

- débloquer des situations de non-dit,
- faciliter les échanges entre les acteurs,
- éclairer les points de vue de chacun et les enjeux du collectif,
- favorise la reconnaissance mutuelle des représentations de chacun,
- faciliter et enrichir le processus de décision.

L'objectif n'est donc pas de proposer des solutions d'experts, mais plutôt d'améliorer le processus collectif de décision, tant sur son aspect technique (informations, solutions techniques...) que social (meilleure concertation, renforcement du pouvoir de l'acteur dans la décision, ...). ComMod postule que la qualité des décisions dépend de la qualité du processus de décision lui-même.

Parce que les règles résultent de l'interaction entre acteurs, elles se trouvent légitimées aux yeux de l'ensemble des acteurs et elles intègrent les perceptions particulières. C'est à partir d'une conception partagée sur l'évolution de la situation présente que les acteurs peuvent « décider » des objectifs de très long terme, sur la base desquels les scénarios qui permettraient de les atteindre pourront être discutés. [Bousquet, 2001]

Le grand avantage des simulations multi-agents dans cette optique est d'être intelligible par les acteurs et de permettre l'articulation des points de vue multiples. Les sessions de jeux de rôles permettent de rejouer des situations existantes sous la forme d'un simulacre (ou d'une parodie) où les acteurs réels du développement rejouent leur propre rôle ou endossent celui d'un autre. Evidemment il s'agit de situations caricaturales, sans enjeu, qui ressemblent plus ou moins à des situations véritables. Mais ces mises en situations factices permettent la prise de distance. Elles sont alors efficaces pour déceler et faire comprendre un processus et pour concevoir collectivement une représentation partagée du phénomène. Les JdR permettent notamment de révéler des règles sociales implicites et des interactions entre acteurs qui auraient pu échapper au scientifique. Le couplage entre SMA et JdR permet d'explorer des dynamiques d'interactions entre des comportements individuels et sociaux et des dynamiques environnementales dans l'espoir d'en dégager des évolutions acceptables par tous.

La démarche globale est envisagée comme un processus itératif de recherche selon un cycle terrain→modélisation→simulation→terrain. Cela ne signifie pas nécessairement une complexification progressive d'un modèle qui devrait incorporer de plus en plus d'éléments pour mieux "coller à la réalité", mais plutôt l'acceptation d'une diversité de modèles qui constituent alors une véritable base de connaissances.

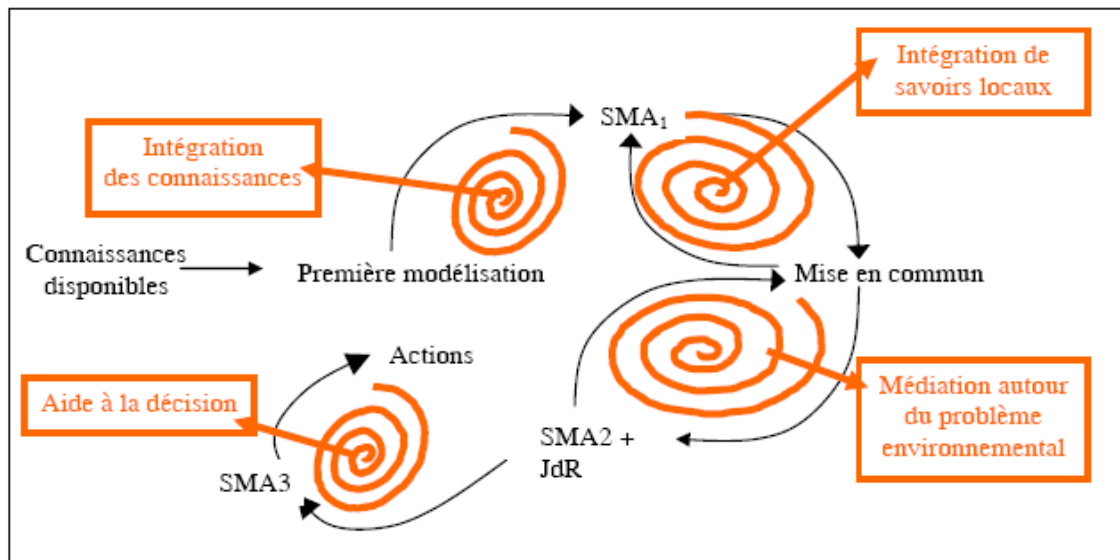


Figure 3-7 : Schéma de la démarche itérative de construction d'un SMA et du jeu de rôle associé. D'après [Etienne, 2005]

ComMod est donc une démarche d'apprentissage; un processus d'enrichissement progressif qui améliore la connaissance du système étudié, la partage avec les parties prenantes et améliore les choix décisionnels.

3.6.2.3 Proposer des objets de médiation en respectant des règles déontologiques

Le couplage SMA et JdR peut être aussi vu comme la possibilité d'ouvrir la boîte noire d'un modèle multi-agent [Barreteau et al., 2001] et pour en permettre une sorte de "validation" sociale [Barreteau & Bousquet, 1999].

Mais, qu'on ne se leurre pas, la mise en place d'une démarche ComMod n'est pas une solution miracle pour résoudre instantanément des conflits liés à l'utilisation de ressources. En effet, améliorer un processus de décision collective nécessite au préalable une longue pratique du terrain et une bonne connaissance des acteurs et des enjeux.

Les SMA et les JdR constituent des succédanés de situations réelles. En cela, ils constituent des objets intermédiaires qui impliquent une distance à la réalité ou plutôt à des situations souvent douloureuses et trop prégnantes. Cette distanciation autorise ainsi des discussions sur des sujets plus ou moins conflictuels, voire tabous [Aquino et al., 2003]. En s'insérant dans un tissu social, le modèle, co-contruit avec les acteurs, devient alors un objet de médiation, favorisant la résolution de conflits et la décision collective.

À une époque où l'on se tourne de plus en plus souvent vers les modèles pour l'aide à la décision, il faut préciser que la démarche ComMod véhicule une posture scientifique. Elle implique que la perception du scientifique n'est qu'une simple option parmi d'autres et non pas une perception supposée juste vers laquelle doit tendre la décision²⁷. À ce titre, le modélisateur doit s'imposer des règles déontologiques. Même si son mobile paraît juste et salubre, il doit s'interdire d'utiliser ces outils pour influencer la décision et faire accepter ses idées. En effet, la puissance suggestive des

²⁷ Dans le domaine des systèmes complexes en situation d'incertitude, cette posture scientifique est connue sous le terme de posture "post-normale" [Funtowicz & Ravetz, 1994]. Dans une situation où les faits sont incertains, les valeurs contestées, les enjeux élevés et les décisions urgentes, elle suppose que l'implication des acteurs dans le processus participatif est plus importante pour la mise en œuvre d'une décision que la décision elle-même. Elle implique par ailleurs que les chercheurs "doivent être conscients que leur compétence ne constitue qu'un maillon du processus politique. Leurs contributions peuvent aider à définir l'éventail des résultats possibles, mais ils ne peuvent arrêter de solutions politiques uniques. Ce contexte diffère à ce point de celui qui a prévalu dans la recherche traditionnelle qu'il est qualifié à juste titre de post-normal" [ibid.].

modèles et des jeux de rôles peut facilement devenir un outil de manipulation. Aussi, pour limiter ces risques, le collectif de chercheurs réfléchissant sur ComMod a rédigé une charte de "bonne conduite" sur l'usage des modèles dans le domaine de la gestion des ressources renouvelables [ComMod, 2005]. De mon point de vue, l'aspect "prévention de la manipulation" est un point essentiel qu'il faudrait encore approfondir.

Pour explorer davantage le sujet, le site ComMod²⁸ propose des études de cas, des articles et la charte. [Aquino et al., 2002] présentent une comparaison de cinq expériences différentes de modélisation d'accompagnement. Par ailleurs, un numéro spécial de la revue JASSS est dédié à ComMod [Barreteau et al., 2003]. Mais l'évaluation critique de la démarche²⁹, sa déontologie, le contexte de sa mise en œuvre restent des chantiers à explorer qui font l'objet d'un projet ADD en cours.

Cependant et malgré mon intérêt, la démarche ComMod n'est pas le centre de cette thèse. Je n'approfondirai donc pas plus le sujet ici, même si beaucoup d'idées présentées dans ce document s'inspirent fortement de ComMod.

3.6.3 Générer des scénarios exploratoires par simulation interactive

Les travaux engagés dernièrement sur Cormas vont dans le sens de cette approche. Au lieu de regarder une simulation sans pouvoir intervenir sur les processus en cours, de nouveaux outils permettent d'interagir avec le simulateur. Les utilisateurs peuvent définir les indicateurs qui leur conviennent et choisir d'observer la simulation à travers ces filtres. S'agissant fréquemment de ressources spatialisées, ils ont aussi la possibilité de ne voir qu'une partie de l'espace (généralement celle qui les concerne). Ils peuvent aussi interagir directement sur l'agent sensé les représenter (leur avatar) en les déplaçant ou en leur envoyant une série de messages et en agissant sur le couvert végétal ou la ressource hydrique via cet intermédiaire. L'intérêt est alors de proposer un ensemble d'activités de base dont l'utilisateur dispose pour façonner sa propre stratégie. Ainsi, avec ce nouvel outil, le modélisateur ne décrit plus le comportement des agents mais met à disposition des actions élémentaires que les utilisateurs organisent pour interagir avec l'environnement et les autres agents. Car ces simulations interactives peuvent également être distribuées sur des machines en réseau permettant ainsi à plusieurs utilisateurs d'interagir sur un même environnement virtuel. Si je trouve peu d'intérêt à des simulations interactives sur Internet, je pense par contre que la proximité des utilisateurs permet des interactions directes plus riches, autorisant alors des communications de type non-verbales. Ce projet d'une plate-forme de simulation interactive et distribuée est un chantier en cours de réalisation qui s'appuie sur des expériences concrètes de modélisation d'accompagnement et des besoins qui s'y sont exprimés. Deux types d'outils interactifs se dégagent : d'un côté, la manipulation directe des agents-avatars par l'utilisateur et de l'autre, la saisie des données par une tierce personne jouant le rôle de manipulateur de la simulation (elle imprime et fournit des tableaux de saisies qui sont à leur tour remplis par les utilisateurs)³⁰.

²⁸ Le site web de ComMod (<http://www.commod.org>) contient la charte ComMod (en français et en anglais), la description de quelques applications et la liste des personnes qui participent au réseau.

²⁹ En particulier, la convocation des acteurs, la question des jeux de pouvoir qui peuvent survenir lors d'un "dialogue" ComMod (doit-on essayer de réduire les inégalités de pouvoir ?), la posture soi-disant neutre du médiateur, évaluation des impacts sur la décision et le long terme, changement d'échelle (les expériences ComMod opèrent au niveau local et ne touchent qu'un nombre réduit d'individus), naïveté de la démarche qui imagine que les interactions sociales peuvent se résumer à des échanges lors d'ateliers, etc...[Lavigne-Delville et al. 2000]

³⁰ On pourrait rétorquer qu'il serait plus judicieux d'utiliser des plates-formes de jeux vidéos qui commencent à apparaître. Mais elles sont trop orientées pour des jeux stratégiques ou de type "first person shooter" et imposent ainsi des formats d'interaction prédéfinis. Par ailleurs, la visualisation réaliste en 3D n'est pas forcément un objectif à atteindre. Garder une distance vis-à-vis d'une situation réelle me semble un élément important de ComMod. Enfin, sans même aborder la nécessité de co-construction des modèles, les projets de développement nécessitent souvent une

3.7 CONCLUSION DU CHAPITRE

Les modèles macroscopiques prennent en compte un groupe d'individus vu comme une structure pouvant être caractérisée par des variables. Pour les simulations centrées-individus, la structure est vue comme un caractère émergent des interactions entre les individus. Après avoir décrit succinctement ces deux approches de la modélisation, j'ai expliqué les avantages des systèmes multi-agents pour aborder la modélisation des systèmes dans le cadre d'une "pensée complexe" [Morin, 1990] et en particulier pour traiter de l'organisation des eco-socio-systèmes. Il s'avère que les SMA peuvent jouer un rôle décisif pour dépasser le clivage entre les partisans du réductionnisme et les tenants des démarches holistiques.

Les SMA permettent de coupler des dynamiques diverses pour étudier leurs interactions, sans faire l'hypothèse de positionnement à l'équilibre. La modélisation multi-agent autorise alors un dialogue entre les disciplines pour tenter une démarche transdisciplinaire.

De plus, étant centrée sur l'individu, la simulation multi-agent permet à l'utilisateur de se mettre à la place de l'agent dont il suit l'évolution et, par exemple, de "penser comme un loup, un mouton ou une mouche" [Wilensky & Reisman, 2006] !

Dans le cadre de l'aide à la gestion des ressources renouvelables, la modélisation multi-agent ouvre des perspectives nouvelles par rapport aux démarches plus standards (aide à la décision, conseil, expertise agronomique,...). Parce que les SMA peuvent être compréhensibles par tous (scientifiques, décideurs et acteurs du développement), les simulations multi-agents peuvent s'intégrer dans des démarches participatives pour accompagner des décisions collectives. Le couplage SMA-JdR permet alors d'explorer des succédanés de situations réelles (assistées par ordinateur) où chaque participant peut agir, échanger et exprimer son point de vue mais aussi mieux comprendre son rôle et celui des autres vis-à-vis de ressources collectives ou interdépendantes.

Ainsi, les SMA apparaissent comme des outils privilégiés pour mener des scénarios exploratoires dans des simulations interactives impliquant fortement les acteurs. Car, dès qu'il s'agit de l'action des êtres humains, il ne s'agit pas de décider seul pour générer effectivement des changements de conduite des acteurs. Dans le domaine des ressources renouvelables, ce constat implique que tous ceux qui influent par leur comportement sur la dynamique globale, prennent part activement à la décision. Car il s'avère que l'appropriation d'une décision favorise un engagement des acteurs plus conscients de leur rôle. Toutefois la démarche prospective des systèmes socio-environnementaux nécessite une déontologie explicite, en particulier concernant les tentations de manipulation.

Si ce chapitre s'est intéressé aux atouts des SMA, le reste de la thèse s'attache plus à décrire leurs faiblesses. Car, si certains annoncent "la fin des débuts pour les systèmes multi-agents" [Axtell, 2006], il importe de rester très critique et clairvoyant à leur égard en identifiant leurs points faibles pour mieux les appréhender et les traiter.

LE STATUT DE LA SIMULATION ET SES CONSEQUENCES POUR LA « VALIDATION » DES SYSTEMES MULTI-AGENTS

"Pendant des siècles, l'Angleterre s'est appuyée sur la protection, l'a pratiquée jusqu'à ses plus extrêmes limites, et en a obtenu des résultats satisfaisants. Après deux siècles, elle a jugé commode d'adopter le libre-échange, car elle pense que la protection n'a plus rien à lui offrir. Hé bien, Messieurs, la connaissance que j'ai de notre pays me conduit à penser que, dans moins de deux cents ans, lorsque l'Amérique aura tiré de la protection tout ce qu'elle a à offrir, elle adoptera le libre échange."

Ulysses Grant, président des Etats-Unis de 1868 à 1876

Après avoir décrit les avantages des SMA pour la modélisation des systèmes complexes, ce chapitre aborde certaines spécificités de ces outils et leurs conséquences pour leur évaluation, particulièrement à propos de la fiabilité et de la vérification des résultats qu'ils énoncent. Car, contrairement aux équations mathématiques, on ne peut pas prouver les propriétés intrinsèques d'un SMA (convergence, cycles, attracteurs, ...) et le passage obligé par la simulation oblige à considérer ce statut particulier.

En effet, le temps dans un SMA joue un rôle actif et décisif : en se déroulant progressivement, il orchestre les entités en les activant au fur et à mesure de la simulation. Il est un élément essentiel car il anime les agents qui se transforment et interagissent pour produire des phénomènes émergents. Ces propriétés globales d'un SMA sont donc des constructions temporelles. En cela, elles ne peuvent pas se résumer : on ne peut pas montrer ces propriétés émergentes sans le recours à la simulation. Elles ne sont pas décrites formellement par le modèle mais sont véritablement créées par la simulation. C'est pourquoi il est important de distinguer le modèle de la simulation. D'ailleurs, et contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la conception d'un SMA ne donne pas immédiatement accès à la compréhension de son comportement [Bommel, 1997b].

Des divergences dues à des écarts d'interprétation renforcent encore la nécessité de séparer ces deux notions. En effet, la conception d'un SMA doit suivre une chaîne de traitement dont le point de départ consiste à traduire les concepts issus du domaine étudié pour produire un modèle opérationnel puis un code informatique. Or cette suite d'activités peut être la source d'erreurs ou d'artefacts pouvant conduire à des écarts d'interprétation entre les résultats d'une simulation et les conclusions qu'on en déduit pour le modèle.

4.1 DISTINGUER "MODELE" ET "SIMULATION"

Il est fréquent de rencontrer dans la littérature l'emploi du mot "simulation" pour parler de modèle. Ainsi, la définition, trop large, retenue par la Society for Computer Simulation (SCS) de John MacLeod, indique que la simulation informatique renvoie à "tout usage de l'ordinateur pour modéliser des choses" [McLeod, 1986]. Mais un calcul formel effectué par un ordinateur par exemple ne peut pas exactement être qualifié de simulation. Dans notre domaine, la définition la plus citée aujourd'hui reste celle que propose Paul Fishwick :

"Computer simulation is the discipline of designing a model of an actual or theoretical physical system, executing the model on a digital computer, and analyzing the execution output" [Fishwick, 1995]

Mais ici aussi, l'auteur décrit l'activité complète de modélisation et non pas la simulation en tant que telle. Parmi les nombreuses définitions que j'ai trouvées, la première qui s'attache à décrire spécifiquement l'exécution dynamique d'un modèle est proposée par David Hill :

"La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions." [Hill, 1993]

L'auteur distingue clairement le modèle (une abstraction) de son exécution par une machine qui en déploie la représentation pour révéler à l'observateur des fonctionnements du système cible. Il met en avant le fait que la simulation aide à comprendre le fonctionnement dynamique du modèle. Car le fait d'avoir conçu un SMA ne donne pas forcément accès à la compréhension de son comportement. Or celle-ci est déjà une première étape, indispensable pour tenter d'interpréter le fonctionnement du système cible. Par conséquent, les termes "simulation" et "modèle" ne sont pas analogues.

4.2 LA SIMULATION REVELE L'IMPORTANCE DU TEMPS

4.2.1 Prise en compte progressive du temps dans les modèles

Travailler sur la dimension spatiale d'un écosystème nécessite également de considérer le système dans sa dynamique et d'introduire le rôle du temps. Dans le domaine de l'écologie par exemple, R. Barbault [1992] insiste sur l'importance des retards dans les processus écologiques. Dans le domaine industriel, en analysant le fonctionnement des chaînes de production, Goldratt a aussi montré le rôle prépondérant que jouent les délais dans le fonctionnement des systèmes de production industrielle [Goldratt et Cox, 1993]. En économie et évidemment en politique, le temps joue également un rôle prépondérant : des recettes économiques qui ont fonctionné dans le passé, ne s'appliquent souvent plus à une situation qui diffère de celle de l'époque. Sous prétexte qu'un modèle de développement économique a bien fonctionné à un moment donné, il est judicieux mais malhonnête de vouloir plaquer ce même modèle à une situation actuelle qui diffère sur bien des aspects. La citation en exergue illustre mon propos.

En cherchant à retracer l'histoire et le fonctionnement des modèles de l'économétrie, on s'aperçoit d'ailleurs que la notion de temps a été occultée pendant longtemps. Aujourd'hui il est davantage pris en considération mais reste néanmoins un aspect secondaire. Ainsi, [Boussard et al., 2005] expliquent que les plus frustrés des modèles d'équilibre général ne tiennent pas compte du temps. En effet, dans les modèles "walrassiens"³¹, tous les phénomènes sont simultanés et tout réagit sur tout de façon instantanée. Par exemple, la production et la consommation sont instantanées pour permettre un équilibre idéal entre l'offre et la demande. Or "l'imperfection de l'information" et les délais de réaction des agents génèrent des phénomènes loin d'être secondaires. A partir de ces premiers modèles, le temps a progressivement été pris en compte.

Ainsi les économistes ont d'abord introduit la notion d'*actualisation* dans leurs équations. Elle est utilisée pour estimer la valeur ou le revenu futur d'un bien et déterminer ainsi sa valeur actuelle. Mais les techniques d'évaluation sont complexes et dépendent de la nature de l'investissement. Ces

³¹ A l'origine de l'introduction des équations mathématiques en économie, Léon Walras (1834-1910) est considéré comme le précurseur des modèles économiques. Il a également cherché à introduire la notion d'anticipation des agents économiques.

estimations, censées prendre en compte le coût du temps, sont fournies au préalable par le80 concepteur ; elles ne proviennent pas de résultat du modèle.

Les économistes ont ensuite cherché à évaluer la rémunération du risque sur le moyen ou le long terme en introduisant la dimension temporelle dans leurs modèles. [Boussard et al., 2005] expliquent que "la façon « pure » de voir le temps dans un modèle dit « néoclassique » est de considérer qu'un objet identifié à deux moments différents constitue en fait deux objets différents". En reconnaissant l'artifice de modélisation, les auteurs estiment que ce procédé permet d'introduire "les considérations sur l'épargne et l'investissement qui manquait évidemment dans le modèle walrassien" [ibid.]. Ainsi, la prise en compte du temps revient à nouveau à chercher à mieux définir un *taux d'actualisation* qui reste l'un des sujets majeurs de préoccupation des économistes. Mais il est dommage de restreindre l'importance du temps à cette seule notion.

4.2.2 Distribution des interactions au cours du temps

La simulation consiste à faire s'exprimer un modèle. En déroulant le temps, elle permet de déplier sa représentation à la manière d'un bon vin qui délivre ses arômes une fois ouvert. La simulation révèle alors à l'observateur des comportements qui peuvent paraître surprenants. Certains parlent d'émergence, c'est-à-dire de phénomènes globaux qui ne sont pas spécifiés au niveau du modèle. Nulle magie n'est à l'œuvre ici. Le cerveau humain n'est simplement pas capable de "prendre en compte en même temps le comportement d'un grand nombre d'éléments qui s'influencent mutuellement" [Deffuant et al., 2003a]. La force de la simulation est justement de permettre cette prise en compte. C'est précisément ce pouvoir de la simulation qui reste un objet de fascination, même pour un modélisateur habitué à manipuler ce type d'outils.

4.3 LA SIMULATION REVELE LA COMPLEXITE

4.3.1 La complexité selon Von Neumann

En étudiant de manière détaillée le déroulement d'une simulation, nous sommes capables a posteriori d'énoncer une explication logique du phénomène émergent. Dans cette perspective, "les simulations ont pour objectif premier de faire progresser la connaissance du fonctionnement du modèle, avant de faire progresser la connaissance du phénomène représenté" [Deffuant et al., 2003b]. On présume pourtant qu'un modèle devrait être connu par ses concepteurs, dans ses moindres mécanismes. Comment se fait-il alors qu'il faille encore l'étudier pour le comprendre [ibid.], [Amblard, 2003] ? Les auteurs rappellent alors la notion de complexité telle que Von Neumann la percevait : une machine est complexe si l'ensemble de ses comportements possibles est infiniment plus difficile à caractériser que ses règles de fonctionnement [Von Neumann et Burks, 1956]. Von Neumann s'inspire du fonctionnement de la machine de Turing pour expliquer sa perception de la complexité. Il explique que si les règles de fonctionnement de cette machine sont simples, ses comportements sont bien plus difficiles à prévoir. Il est impossible par exemple de savoir à l'avance si la machine s'arrêtera ou non. Ainsi, une machine très compliquée comme une centrale nucléaire n'est pas complexe dans le sens de Von Neumann car l'ensemble de ses comportements est réduit [Amblard, 2003].

4.3.2 ECEC : un exemple de modèle simple et de résultats non triviaux

Le modèle ECEC (Evolution de la Cooperation dans un Contexte Ecologique) est un bon exemple de complexité par simulation. Etant donné qu'ECEC est un exemple sur lequel je reviendrai au cours de cette thèse, il est présenté plus en détail en annexe 3 (la description de sa structure est présentée page 294). En effet, il s'agit d'un modèle-école pour notre équipe car :

- Sa structure est simple et ses mécanismes sont aisés à comprendre,

- Il illustre deux dynamiques couplées : une dynamique "naturelle" de croissance de la végétation et une dynamique "sociale" d'agents en compétition pour cette ressource,
- Il est spatialisé : les plantes sont distribuées de façon hétérogène sur un espace sur lequel des agents ruminants se déplacent et broutent les plantes.
- Malgré sa simplicité, ses résultats de simulation ne sont pas triviaux,
- On peut le comparer à des modèles classiques de l'écologie : le modèle de Lotka-Volterra (dans le cas d'une seule population d'agents (prédateurs) prélevant de la végétation qu'on associe aux proies) ou le modèle de Gause et son principe d'exclusion compétitive ou d'autres modèles décrivant des comportements de compétitions intra et inter-spécifiques,
- Nous en avons fait la réplcation à partir d'un article d'une autre équipe [Pepper et Smuts, 2000] et comme nous le verrons plus loin (chap. 9.1), la réplcation est un phénomène à prendre sérieusement en compte à l'heure actuelle.

Nous nous en servons fréquemment comme modèle standard pour présenter et expliquer le fonctionnement d'un SMA. Il est aisé d'en expliquer la structure et les dynamiques. En montrant une simulation pas à pas, les personnes non-initiées aux SMA en saisissent rapidement les mécanismes et perçoivent mieux ce que nous entendons par modèle multi-agent dans le cadre de la gestion des ressources. Les biologistes y voient une démonstration du principe d'exclusion compétitive (principe de Gause) : deux espèces ne peuvent coexister indéfiniment si elles sont en compétition sur une ressource limitée ; elles ne peuvent occuper la même niche écologique et l'espèce la plus performante (mesurée en termes de fitness de population³²) élimine l'autre. Dans le cas du modèle ECEC, l'espèce des ruminants la plus vorace exclut l'espèce la moins vorace en consommant la majorité des plantes et en se reproduisant plus rapidement.

Les figures suivantes illustrent une vue de la grille spatiale avec les deux populations de ruminants ainsi que des graphes temporels montrant l'évolution des tailles des populations.

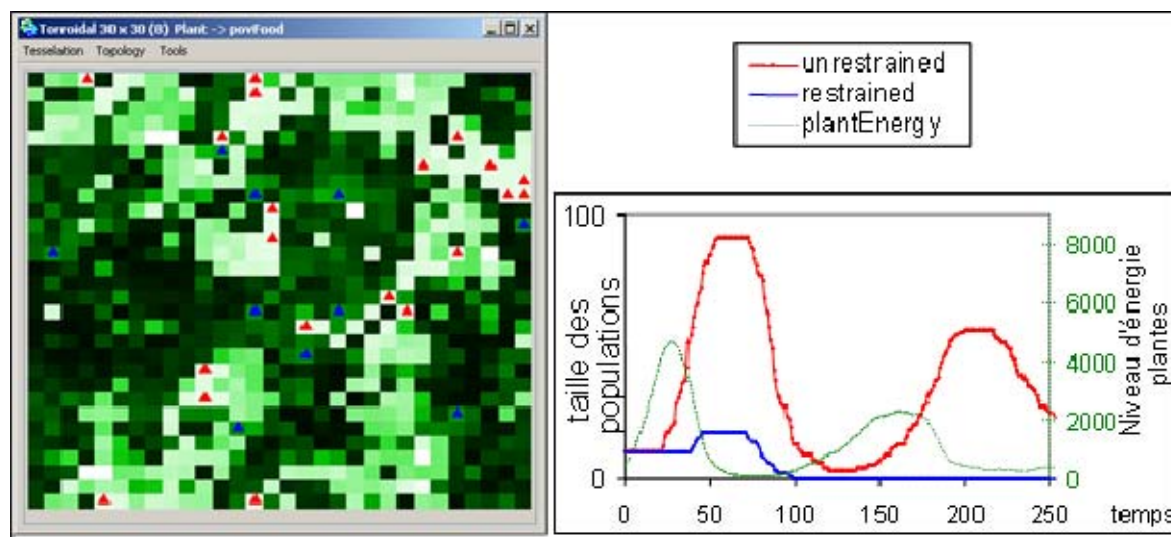


Figure 4-1 : Exemple de simulation de ECEC. A gauche, une vue de la grille spatiale montrant la répartition des plantes dont le niveau d'énergie de chacune suit à un gradient de vert et les agents "restreints" (bleu) et "non restreints" (rouge). A droite, évolution des effectifs au cours du temps d'une simulation : au pas de temps 100, la population des "restreints" est exclue par la population des "non restreints".

Après avoir expliqué ce premier scénario, nous en présentons un autre : sans modifier le modèle, mais juste en remplaçant la structure initiale de l'espace en une répartition hétérogène des plantes

³² La fitness est un mot anglais, signifiant santé, forme. Si l'aérobic fait un usage intensif de ce mot, l'écologie évolutive l'utilise également mais dans un autre sens : il exprime l' "aptitude phénotypique" des individus à avoir des descendants matures. La structure interne d'une niche écologique est déterminée par plusieurs critères dont la fitness.

par paquets (ou patches), la réponse à la question "que va-t-il se passer ?" est beaucoup moins évidente. La majorité des personnes interrogées ne la connaissent pas, même si elles n'ont plus de doute sur le fonctionnement du modèle. Elles découvrent alors avec intérêt que l'espèce des ruminants la moins compétitive survie quant la plus vorace disparaît.

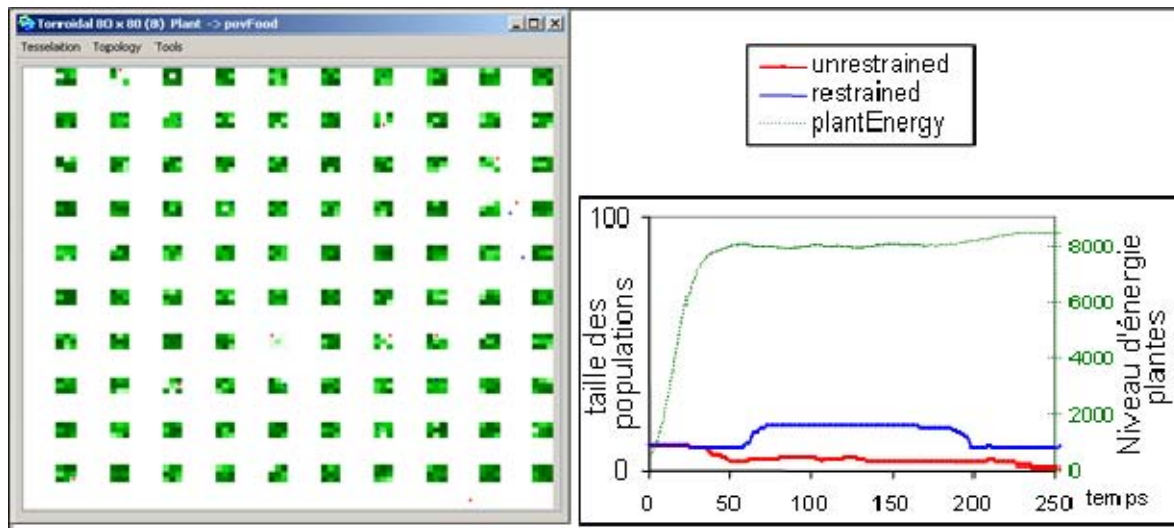


Figure 4-2 : Exemple de simulation de ECEC sur un espace fragmenté : il y a autant de plantes que dans la simulation précédente, mais les patches sont séparés par des zones vides. À gauche, une vue de la grille spatiale montrant les patches de plantes. À droite, évolution des effectifs au cours du temps : la population des "non restreints" s'éteint quand les "restreints" parviennent à survivre.

L'explication de ce phénomène semble évidente *a posteriori*. Quelle que soit son espèce, chaque ruminant éprouve des difficultés à trouver les patches éparpillés. Mais ceux qui sont découverts par les ruminants les moins voraces sont maintenus à un niveau de production satisfaisant, alors que ceux qui sont découverts par les "plus compétitifs" sont rapidement coupés à blanc et ne produisent plus assez pour la survie de leurs hôtes.

La réfutation du principe d'exclusion compétitive est montrée ici de façon simple. Le modèle ECEC révèle à l'observateur des résultats étonnants. Mais l'explication de ce phénomène n'est raisonnée qu'*a posteriori*. Sa relative simplicité permet d'en comprendre facilement la structure et le fonctionnement. Et pourtant, il est extrêmement difficile d'anticiper le déroulement de tous les événements qui influencent les résultats globaux. Nous ne pouvons simplement pas imaginer son fonctionnement global sans aide. Il nous faut l'assistance de la simulation. Car si l'ordinateur n'éprouve aucune difficulté à calculer un grand nombre de changements d'état et d'interactions, notre esprit n'est capable d'en imaginer que quelques-uns. Malgré la simplicité d'un modèle, même clairement spécifié, le déroulement du temps dans une simulation nous révèle des phénomènes complexes que notre cerveau, seul, n'est pas capable d'anticiper.

4.4 LA SIMULATION : UNE EXPERIENCE INCOMPRESSIBLE

4.4.1 Une expérience sans raccourci...

Dans [Varenne, 2001], l'auteur montre qu'il existe dans la littérature scientifique, philosophique et sociologique, trois grands types de thèses concernant le statut de la simulation par ordinateur. On y considère la simulation soit comme une sorte d'expérience, soit au contraire comme un simple outil intellectuel ou théorique, soit enfin, comme un moyen "d'apprendre quelque chose au sujet de la nature des choses, un moyen intermédiaire entre théorie et expérience" (c'est cette troisième thèse qui a permis une discussion sur l'épistémologie au chapitre 1). Par exemple, une simulation par ordinateur de type "Artificial Life" sera considérée comme une expérience à part entière. Dans un autre cadre, de type agronomique par exemple, la croissance d'une plante selon une formule

mathématique peut se révéler comme étant purement théorique, l'ordinateur ne servant qu'à accélérer les calculs qu'un être humain pourrait patiemment exécuter à la main. L'extrait suivant de [Varenne, 2003] exprime la troisième thèse :

Nous pouvons en effet en déduire que la simulation nous apprend toujours quelque chose, à l'image d'un récit dont on ne connaît pas a priori la fin. Certains auteurs ont ainsi assimilé la simulation à une « histoire d'états » à cause du caractère pas à pas de son traitement. L'ordinateur raconterait une histoire, mot à mot, sans donner pour autant la capacité de la résumer. Cette capacité que la simulation possède de passer pour une aventure de l'esprit provient en effet du caractère incompressible de son traitement formel : pour telle simulation particulière, il n'y a pas – dans l'état des connaissances du moment – d'autres chemins intellectuels pour parvenir aux résultats. Et le résultat est dépendant de l'intégralité du chemin. Il faut donc le parcourir pas à pas sans espérer le raccourcir.

Ainsi un modèle multi-agent dont les règles de fonctionnement sont totalement connues, peut devenir un objet d'investigation expérimentale. La simulation acquiert alors le statut d'expérimentation au même titre que l'expérimentation classique de laboratoire. Elle a simplement lieu dans un laboratoire virtuel.

4.4.2 ... qui ne peut se démontrer

En étudiant mathématiquement les propriétés combinatoires des automates cellulaires, Claude Lobry dans [Lobry et Elmoznino, 2000] apporte le même constat, mais il considère au contraire que cet état de fait est un grave problème. Sans même aborder le problème des erreurs d'implémentation, il argumente sa position à partir d'une étude portant sur un modèle décrivant un processus théorique de contagion spatialisée : un automate cellulaire à quatre états possibles (susceptible, infecté, infectieux et réfractaire) dont la fonction de transition est simple et déterministe. Le modèle étant complètement déterministe et fini, "toute solution finira par être périodique" [Treuil et Lobry, 2003]. Le problème est qu'à partir d'une configuration initiale quelconque, nous ne pouvons pas prédire (ou prouver mathématiquement) la taille de ce cycle périodique. Le système peut rapidement converger vers une solution stable ou bien peut à l'opposé entrer dans un cycle dont on ne connaît pas à l'avance la taille de la période. Nous ne pouvons que faire tourner la simulation pendant une durée inconnue à l'avance pour constater si le système est rentré dans un cycle.

Une simulation ne peut donner qu'un résultat (un "fait de calcul"). Or il faut pouvoir décrire et affirmer les propriétés d'un modèle ou de l'ensemble complet des simulations (convergence, cycles, attracteurs, ...). À l'opposé, un système d'équations est un "être mathématique" qui fournit des faits de calculs mais surtout qui autorise une *démonstration* porteuse de sens. En partant du constat qu'il est matériellement impossible de faire une analyse exhaustive de toutes les configurations possibles, Claude Lobry conclut que les automates cellulaires et les SMA ne permettent pas de démontrer les conséquences générales d'un modèle : à partir du domaine de définition de leurs paramètres, on ne peut pas connaître ni prouver l'ensemble de leurs propriétés. Il appelle alors de ses vœux la mise en place d'une théorie du modèle³³ : "pour savoir ce qui se passe

³³ A ne pas confondre avec la théorie des modèles. La théorie des modèles est une théorie de la vérité mathématique. Elle consiste essentiellement à dire qu'une théorie est mathématiquement valide si on peut définir un univers dans laquelle elle est vraie.

Claude Lobry explique : « Depuis Newton, on résout des équations par un calcul mathématique. Depuis 1950 en plus du calcul mathématique on dispose d'un instrument qui permet de faire des simulations sur des équations, ce qui augmente la puissance du mathématicien. Mais il n'y a rien de changé dans le processus intellectuel. On va simplement beaucoup plus vite. Ensuite ce qui change de façon fondamentale depuis les années 80 environ, c'est l'accès à la mise en programme. La mise en programme remplace la mise en équations. C'est très différent parce qu'avec la mise en équation mathématique on est dans un champ très théorisé alors que la mise en programme suivie de simulations ne s'accompagne pas d'une théorie du modèle. L'ordinateur est incontestable car c'est une mécanique qui produit des

[dans un modèle multi-agent], il n'y a pas d'autre solution que de faire une théorie" [ibid]. Car⁸⁴ prévient-il "le risque est grand de connaître un jour un « accident de modélisation », c'est-à-dire une décision catastrophique prise sur la base des prédictions d'un mauvais modèle"³⁴.

Il est vrai que l'on peut difficilement résumer un SMA, dans le sens d'en déduire une théorie plus concise (ou plutôt un autre modèle plus concis). Même si on reconnaît avec JP. Treuil qu'un programme informatique est aussi un être mathématique ("il n'y a pas de différence de nature entre mise en équations et mise en programme" [ibid.]), il faut admettre que dans l'état actuel de nos connaissances, nous ne pouvons pas démontrer ses conclusions. On peut seulement montrer un certain nombre de résultats issus de simulations particulières (des faits de calcul), sans possibilité d'exhaustivité. Ainsi, dans l'exemple de l'automate cellulaire exposé par Claude Lobry, les mécanismes de base sont entièrement spécifiés et simples. A partir de ces conditions, on peut rechercher une théorie qui résumerait l'ensemble des comportements du modèle. Mais, je doute d'y parvenir. Il me paraît difficile qu'une telle théorie puisse expliquer la totalité des propriétés d'un SMA ; à mon avis, elle ne pourra être que partielle et incomplète.

Par ailleurs, ces problèmes ne sont pas exclusifs des SMA. Le fameux modèle macroéconomique standard à 300.000 équations ne peut pas non plus être démontré. [Boussard et al., 2005] expliquent qu'il ne peut pas fonctionner plus d'une dizaine d'années car "au-delà le système d'équations à résoudre n'a plus de solution en raison des difficultés de calcul numérique liées à la trop grande variabilité des prix". Comme il est expliqué au début de ce chapitre, le temps de ces modèles néoclassiques est représenté par un artifice qui consiste à dupliquer un objet (donc une équation) pour chaque année supplémentaire. De ce fait, à chaque nouvelle année que l'on souhaite simuler, il faut rajouter 30.000 équations ! Par ailleurs et pour la majorité d'entre eux, les modèles mathématiques nécessitent des approximations pour être résolus et font souvent l'hypothèse de se situer à l'équilibre.

Pour résumer, "cet objet créé par l'homme est donc opaque à son propre créateur, qui doit appliquer une démarche scientifique pour comprendre sa propre création" [Amblard, 2003]. Il est donc indispensable d'observer les comportements d'un modèle par l'expérimentation, pour tenter éventuellement de produire une forme de théorie, plus compacte, de ce fonctionnement. Le chapitre 8 concernant l'exploration des modèles, confirme ces réflexions et montre toute la richesse inattendue qu'un modèle même simple peut dévoiler. A ce propos, [Grimm, 1999], [Deffuant et al. 2003b] et [Amblard, 2003] déplorent l'absence de réflexion plus approfondie sur ce sujet dans la communauté multi-agent. Ils dénoncent le manque de temps et d'efforts passés à tester les modèles après leur élaboration : "généralement quelques simulations sont sommairement comparées à quelques données" [ibid.].

Ainsi, les réticences que C. Lobry émet à l'égard des modèles multi-agents me semblent fondées lorsqu'il s'agit de prendre des décisions importantes à partir des résultats issus d'un modèle mal évalué. Néanmoins, il faut nuancer son propos. Grâce à une exploration approfondie du modèle, on est capable de bien comprendre son comportement et d'en tirer une synthèse pouvant s'approcher d'une théorie. L'analyse poussée d'un modèle procure pour celui qui la mène une meilleure compréhension de son fonctionnement que pour celui qui l'a conçu. De plus, l'absence de preuve formelle d'un SMA n'interdit ni son intérêt, ni son utilisation, à condition bien sûr de garder un regard critique sur cet objet (cf. chap. 1).

Ces considérations doivent inciter les modélisateurs à la prudence : ils doivent surtout favoriser la conception de modèles simples (et donc analysables) plutôt que des systèmes hautement

nombre. Quand on fabrique un outil de modélisation il faut connaître et comprendre le fonctionnement de cet outil : avoir une théorie du modèle, mais plus le modèle est compliqué plus il est difficile d'en faire une théorie. »

³⁴ Cette remarque à mon avis s'applique à tout type de modèle, et c'est bien pour cette raison qu'il faut être très prudent sur l'emploi du mot "validation" et l'utilisation des modèles.

compliqués et soi disant "réalistes" que personne ne pourra ni ne voudra analyser de manière approfondie. Alors dans ce cas, le modèle risque de rester au stade d'usine à gaz, inutile car non porteur de sens.

4.5 LA SIMULATION ET LA NOTION D'EMERGENCE

La notion d'émergence est essentielle pour appréhender la simulation. Il est donc important d'en avoir un aperçu. Car cette notion a fait l'objet de nombreux travaux et est utilisée dans des domaines variés.

4.5.1 Préambule

Le libéralisme économique repose sur l'idée d'ordre spontané du marché et affirme l'existence d'un mécanisme caché grâce auquel les intérêts des individus s'harmonisent naturellement, sans que ceux-ci en aient conscience³⁵. Cette façon de voir la régulation des marchés a été décrite par Adam Smith³⁶ (sa fameuse métaphore de la « main invisible »). Plus tard, Friedrich Hayek [1966] partisan de la déréglementation et de la privatisation reprend ces idées pour expliquer à sa façon les lois du marché³⁷. Ce sont encore ces mêmes idées qui font dire à feu³⁸ Milton Friedman que "l'ordre économique est une émergence, c'est la conséquence non intentionnelle et non voulue des actions d'un grand nombre de personnes mues par leurs seuls intérêts" [Friedman, 1981, cité dans Pesty et al., 1997]. Pour les tenants du libéralisme économique, les interventions de l'état ne font qu'entraver les mécanismes "harmonieux" à l'œuvre.

En biologie, on considère que "la vie d'un individu multicellulaire en tant qu'unité se déroule par l'intermédiaire du fonctionnement de ses composants, mais elle n'est pas déterminée par leurs propriétés" [Maturana & Varela, 1994]. L'attraction du chat pour les souris n'est pas rattachée à l'attrait de toutes les cellules de son corps vers les cellules de la souris, mais procède du comportement du chat dans son entier : une entité émergente dotée de qualités spécifiques. Pour François Jacob, "Les propriétés d'un organisme dépassent la somme des propriétés de ses constituants. La nature fait plus que des additions : elle intègre" [F. Jacob, Leçon inaugurale au Collège de France, 1965, cité dans Morin, 1977].

En allant encore plus loin, les notions de raisonnement et de conscience peuvent être perçues comme des phénomènes émergents à partir de l'interaction des activités des neurones et des perceptions de l'environnement. Partant de ce principe, une architecture d'agents élémentaires, indépendants et néanmoins hiérarchisés, pourrait produire une "Société de l'Esprit" dans les termes de Marvin Minsky [1988] qui se demande "à partir de quel moment se déclenche-t-il quelque

³⁵ *La fable des abeilles* publiée en 1714 par Mandeville illustre cette déconnexion entre les activités individuelles et les mécanismes collectifs [Deffuant et al., 2003b]. Mandeville, considéré comme le précurseur du libéralisme économique, affirme que contrairement aux idées répandues, les "vices privés" comme l'égoïsme contribuent à la richesse des nations alors que la vertu condamne une population à la pauvreté.

³⁶ Pour Adam Smith, la "main invisible" fait référence à une notion d'ordre social spontané. Il exclut toute référence à une providence cachée. Ce n'est qu'une métaphore utilisée pour décrire le processus d'autorégulation à partir de conduites individuelles.

³⁷ A propos de la fable des abeilles de Mandeville, Hayek écrit "[...] dans l'ordre complexe de la société, les résultats des actions des hommes sont très différents de ce qu'ils ont voulu faire, et les individus, en poursuivant leurs propres fins, qu'elles soient égoïstes ou altruistes, produisent des résultats utiles aux autres qu'ils n'avaient pas prévus et dont ils n'ont peut-être même pas eu connaissance ; en fin de compte, l'ordre entier de la société, et même tout ce que nous appelons la culture, est le produit d'efforts individuels qui n'ont jamais eu un tel but, mais ont été canalisés à cette fin par des institutions, des pratiques, et des règles qui n'ont jamais été délibérément inventées, mais dont le succès a assuré la survie et le développement" [Hayek, 1966]

³⁸ Milton Friedman est mort au moment où j'écris ces lignes.

chose qu'on peut appeler une conscience, voire une intelligence ?". Selon de Maturana et Varela, notre esprit ou le sens que nous attachons aux événements, émerge des interactions entre notre milieu extérieur et intérieur.

Enfin, dans son livre très controversé [Wolfram, 2002], Stephen Wolfram pousse la notion d'émergence encore plus loin et affirme que les opérations conduites dans les automates cellulaires se retrouvent partout dans le monde réel. Il propose alors l'hypothèse selon laquelle l'univers entier serait un vaste calculateur fonctionnant sur le mode d'un automate cellulaire et il appelle à une nouvelle science basée sur ces principes.

Comme on vient de le voir, la notion d'émergence touche de très nombreux domaines. Elle est parfois mobilisée pour encourager des pratiques néolibérales ou pour justifier des théories plus ou moins douteuses. Il n'empêche qu'elle demeure une notion très intéressante et novatrice qui se trouve être à la base des SMA.

4.5.2 Une notion délicate qui lie un phénomène global à des comportements individuels

La notion d'émergence s'exprime par des formules vagues telles que « le tout est plus que la somme des parties ». Mais c'est une notion encore à l'état de discussion et sujette à controverses (il suffit de s'intéresser aux débats entre les neurobiologistes et les psychologues pour comprendre l'étendue de la problématique). Différents points de vue concurrents aboutissent à différents types d'émergence, même si la définition qu'en donne le Santa Fe Institut semble convenir à tous :

"Emergence is the arising at the macro level of some patterns, structures and properties of a complex adaptive system that are not contained in the property of its parts". [Cité dans Dessalles & Phan, 2005]

Nombre de ces définitions sont citées et analysées dans [Pesty et al., 1997]. Ce collectif de chercheurs qui réfléchit sur ce sujet dans le cadre des SMA, oppose le concept d'émergence à celui de réduction. Ce dernier consiste à considérer qu'un phénomène peut toujours être expliqué par des processus sous-jacents. Ainsi par exemple, la température est une notion réductible qui résulte de l'agitation thermique des molécules : elle peut se calculer par la moyenne des énergies cinétiques des molécules. On peut donc utiliser cette idée pour souligner ce que n'est pas l'émergence : une manifestation dont l'apparence provient de la conséquence évidente des propriétés des composants du système. A l'opposé, un phénomène est dit émergent lorsqu'on ne peut pas anticiper son évolution à partir de la seule connaissance de ses composants. C'est "le constat de la non-réductibilité de certains domaines à d'autres" [ibid.].

Peut-être touchons-nous ici simplement aux limites de la compréhension humaine, qui ne peut pas prendre en compte simultanément le comportement d'un grand nombre d'éléments qui s'influencent mutuellement. Ces limites nous obligeraient donc à rechercher des explications directement au niveau collectif. On peut alors faire un parallèle avec la notion sur la complexité selon Von Neumann, décrite précédemment : des hypothèses sur les mécanismes élémentaires d'un système ne permettent pas toujours d'en comprendre le comportement global.

Une propriété émergente résulte donc des relations entre les composants d'un système et, dans certains cas, d'un pouvoir causal macroscopique irréductible lié au système lui-même [Dessalles et al., 2007].

4.5.3 Surprise et observateur

A la notion d'émergence, E. Morin associe l'idée de surprise et de nouveauté : "On peut appeler émergence les qualités ou propriétés d'un système qui présentent un caractère de nouveauté par rapport aux qualités ou propriétés des composants considérés isolément ou agencés différemment dans un autre type de système" [Morin, 1977].

Cette idée de surprise fournit ainsi une piste pour souligner que l'émergence nécessite le regard d'un observateur qui s'étonnerait d'un phénomène qu'il perçoit. L'émergence implique que l'articulation qui existe entre un phénomène global et des comportements individuels reste difficilement discernable. La thermodynamique par exemple a établi des lois physiques reliant la pression, le volume et la température d'un gaz ($PV=nRT$ pour les gaz parfaits). Mais le lien avec le niveau inférieur (celui des particules de gaz) est resté longtemps obscur. Seule la théorie cinétique des gaz parfaits a permis après coup de caractériser ce lien grâce à des modèles mathématiques basés sur les statistiques. Les lois physiques de la thermodynamique s'appuient donc sur des phénomènes sous-jacents opérant au niveau de la vitesse et de la collision des atomes de gaz. Cette explication d'un phénomène global par des comportements ayant lieu au niveau inférieur s'inscrit de mon point de vue dans la définition de l'émergence. Même si l'explication fondamentale paraît finalement triviale, celle-ci n'a été proposée qu'a *posteriori*. De nos jours, ce phénomène n'est plus la source d'étonnement car nous avons compris le lien entre les différents niveaux. On peut répéter les expériences ou les simulations sans être surpris des résultats. Cette absence de surprise n'exclut pas l'émergence. Ainsi, même dans les cas où la déconnexion entre deux niveaux paraît importante, il se peut que les comportements collectifs puissent être caractérisés de manière simple.

Ce qui est émergent n'est pas l'état stable, l'invariant ou la trace mais son expression dans un vocabulaire distinct de celui dans lequel les processus sont programmés. Par exemple chez les fourmis, le phénomène émergent n'est pas la trace de phéromones mais son identification par l'observateur comme un chemin entre le nid et la source de nourriture. [Pesty et al., 1997]

C'est dans cette mesure que l'émergence, caractérisée par le passage du niveau micro au niveau macro, dépend de l'observateur. A ce sujet, les auteurs notent qu'en ce qui concerne la température par exemple, l'énergie cinétique moyenne d'un ensemble de molécules n'est pas émergent, "mais le fait de l'appeler " température " et de lui associer une phénoménologie distincte de celle des molécules en fait une". Selon [Atlan, 1986], le problème de la connexion entre niveaux d'organisation serait un faux problème. De par nos méthodes scientifiques, héritées du réductionnisme, nous inventons un vocabulaire à chaque niveau d'organisation. Dans cette acceptation, chaque niveau d'organisation est un point de vue sur la réalité avec ses propres paradigmes. La connexion entre les niveaux est réalisée par l'observateur, mais elle n'a pas d'existence en soit. Dans le même ordre d'idée, [Pesty et al., 1997] expliquent que l'émergence d'un phénomène "est contenue dans le système indépendamment de notre regard comme observateur, mais c'est le changement de regard de l'observateur qui lui permet de percevoir cette émergence (et qui lui a valu la qualification d'émergence). Les fourmilières avec leurs ponts et les termitières avec leurs œuvres architecturales émergent dans la nature depuis des années... sans qu'il y ait présence d'observateur !"

4.5.4 Définition édifiante de l'émergence







Après ces précisions, Jean Pierre Müller propose alors une définition *constructive* de l'émergence. Dans la lignée des travaux de Stephanie Forrest [Forrest, 1990], il définit qu'un phénomène est émergent si :

- Il y a un ensemble d'entités en interaction dont la dynamique est exprimée dans un vocabulaire ou théorie D distincte du phénomène émergent à produire ;
- La dynamique de ces entités interagissantes produit un phénomène global qui peut être un état structuré stable ou même la trace d'exécution ;
- Ce phénomène global peut être observé et décrit dans un vocabulaire ou théorie D', distincte de la dynamique sous-jacente. [Müller, 2002]

Le jeu de la vie, inventé par le mathématicien John Conway en 1970, permet d'illustrer cette définition. Une grille de connexité 8 (voisinage de Moore) contient des cellules dont l'état de chacune est soit vivant soit mort. Les cellules de l'automate obéissent à une règle simple : la

fonction de transition D (si morte et 3 voisins vivants alors vivant. Si vivant et 2 ou 3 voisins vivants alors vivant, sinon mort). La dynamique de l'automate cellulaire produit dans certaines configurations des phénomènes globaux dans lesquels on perçoit des amas de cellules vivantes semblant se déplacer sur la grille (les glisseurs ou "gliders"). Mais le glisseur n'est un objet que du point de vue de l'observateur de la simulation. De plus, le glisseur semble soumis à une règle d'évolution qui le conserve au court du temps (stabilité) comme le montre le tableau suivant :

Tableau 4-1 : Règle d'évolution D' d'un glisseur au court du temps. Au court d'un cycle de 5 pas de temps, le glisseur change de forme et "glisse" sur la grille (la ligne "Position" indique les coordonnées du centre du glisseur par rapport à sa position initiale à T₁).

Temps	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Forme					
Position 	x,y	x,y-1	x,y-1	x+1,y-1	x+1,y-1

Même si aucun objet ne glisse réellement sur la grille, cette analyse du glisseur est formulée par un observateur extérieur qui décrit une nouvelle règle D', distincte de la dynamique sous-jacente D. Par ailleurs, pour identifier et reconnaître un phénomène émergent, le processus qui émerge doit être suffisamment stable, d'où cette idée d'ordre, évoquant justement cette stabilité [Pesty et al., 1997].

A partir de cette définition, on trouvera dans [Bonabeau & Dessalles, 1997] et [Dessalles et al., 2007], les premières formalisations d'un calcul de l'émergence basé sur la différence entre la complexité observée et la complexité attendue.

4.5.5 Emergence faible – émergence forte

Comme nous venons de le voir, l'observation d'un phénomène émergent ne peut se faire qu'avec l'inscription du processus dans l'environnement et à travers l'interprétation de ce phénomène par l'observateur.

Mais le lien entre différents niveaux peut parfois être plus intense que la simple observation décrivant des différences de niveaux. Dans certains cas en effet, le niveau global *rétroagit* sur les comportements individuels. Ce procédé est souvent appelé "l'émergence forte". Certains auteurs utilisent d'ailleurs l'existence de cette rétroaction comme définition même de la complexité. On constate de telles situations dans les phénomènes sociaux : existence d'un marché économique (la main invisible) ou d'institutions produites par un collectif et qui modifient les comportements des individus. Mais nul besoin d'agents intelligents pour voir apparaître cette émergence forte. Des processus de type co-évolution ou sélection naturelle peuvent aussi être considérés comme en faisant partie. On la rencontre aussi en physique lorsque les comportements individuels de particules créent un champ global qui agit en retour sur les trajectoires individuelles. Le chemin parcouru par les fourmis appartient également à ce type d'émergence forte. Par opposition l'exemple du jeu de la vie est catalogué comme émergence faible car le glisseur qui émerge des dynamiques élémentaires n'influence pas le comportement des cellules.

De cette distinction, [Müller, 2004] et [Dessalles et al., 2007] en ont une interprétation différente dans le cas des agents cognitifs. Ils définissent l'émergence forte par le fait que l'interprétation du phénomène émergent doit être faite *par* les entités elles-mêmes qui y participent. Les auteurs nomment cette observation consciente du phénomène la "M-Strong emergence" : les membres d'un collectif prennent conscience de ce que leur collectif produit; ils en possèdent une représentation.

"Dans l'émergence forte, les agents sont partie prenante du processus tout en observant ce dernier,89 ce qui entraîne une rétroaction du niveau d'observation sur le niveau du processus. L'émergence est immanente au système" [Müller, 2002].

A contrario, ils définissent l'émergence faible comme un phénomène produit par un collectif, indépendamment du fait que les membres en aient conscience (même si ce phénomène rétroagit sur les comportements individuels). "On parle d'émergence «faible» lorsque des structures ou propriétés émergentes sont identifiées comme telles par un observateur extérieur" [ibid.].

4.5.6 Auto-organisation et autonomie

La notion d'émergence, on le voit, est un vaste sujet qui a fait l'objet de nombreux travaux dans une grande variété de domaines. Or, cette notion est également essentielle pour aborder ce que John Holland, le père des algorithmes génétiques, appelle les systèmes complexes adaptatifs [Holland, 1995] : par exemple, le chemin du va et vient des fourmis entre la fourmilière et la nourriture est souvent la route la plus directe. Lors de perturbations de l'environnement, ce chemin est par ailleurs capable de s'adapter pour retrouver une certaine optimisation.

Les travaux d'éthologues et d'entomologistes sur les insectes sociaux font apparaître que les propriétés émergentes deviennent observables lorsqu'elles vont dans le sens d'une organisation nouvelle. On parle alors de mécanismes d'*auto-organisation*. Par exemple, [Grassé, 1959] propose la théorie de la stigmergie qui explique que le travail des insectes est coordonné par ce qu'il produit (stigma → pique et ergon → travail => œuvre stimulante) : la réponse à un stimulus transforme ce stimulus dans le stimulus suivant. La coordination et la régulation des tâches sont réalisées sur la base d'information déposée dans l'environnement. Tout comme les approches par marquage, la coordination du groupe ne nécessite pas de communication directe ni de contrôle central. Les agents communiquent indirectement via des phéromones qui diffusent dans l'environnement. Sur les mêmes principes, A. Drogoul a simulé la sociogenèse de spécialisation chez les fourmis [Drogoul, 1993] : la localisation d'une fourmi à un endroit de la fourmilière stimule le renforcement d'une tâche et entraîne progressivement la spécialisation réversible de la fourmi. Craig Reynolds a simulé des comportements d'attaque et de fuite ainsi que des déplacements réalistes de groupes d'agents (appelés Boids) qui régulent leurs distances entre eux par des interactions par champs de forces [Reynolds, 1987].

La particularité de l'auto-organisation des systèmes repose sur leur capacité à produire spontanément et sans contrôle externe une nouvelle organisation du groupe d'agents face à des changements environnementaux. Ces mécanismes produisent des systèmes particulièrement robustes [Di M. Serugendo et al., 2006]. Dans le même ordre d'idée, Francisco Varela, en fondant la notion d'autopoïèse (explications page 138), explique que les organisations vivantes, de la cellule à la société, doivent présenter les capacités de s'auto-produire [Varela, 1979].

On l'aura remarqué, les définitions des systèmes complexes adaptatifs, des systèmes auto-organisés et des systèmes autopoïétiques se basent toutes sur les notions d'émergence. Mais, dans le cadre de cette thèse, l'objectif n'est pas de réfléchir plus avant sur l'émergence, ni sur la justification de principes néolibéraux ou de quelques théories que ce soient qui se prévalent de cette notion, mais d'en capter les éléments fondateurs pour une modélisation véritablement multi-agent.

Le premier de ces éléments est de promouvoir une approche bottom-up en ne s'attachant qu'à représenter les comportements individuels et à laisser apparaître, grâce au rôle du temps et des interactions, l'émergence de phénomènes globaux.

Le deuxième point important est de concevoir des agents qui n'ont pas la possibilité de contrôler complètement la dynamique d'une population, mais de les laisser percevoir et agir localement. Pour un agent donné, les autres agents sont extérieurs à lui-même (nous reviendrons sur ce point au chap. 6 qui traite de l'autonomie) et chacun perçoit l'environnement de façon différente.

Ainsi, plutôt que de "câbler" entièrement l'enchaînement des activités d'un agent, il semble plus intéressant d'essayer de *retrouver* des schémas comportementaux de base qui refléteraient des stratégies observées sur le terrain. Dans de nombreuses applications des SMA traitant de la gestion des ressources naturelles, on constate fréquemment des descriptions de comportements conçues de façon imposée par le modélisateur. Bien que ce travail soit souvent nécessaire pour comprendre et expliquer des pratiques d'acteurs, les modèles produits montrent des comportements qui restent confinés dans des schémas figés. Il leur manque une certaine forme de liberté pouvant déboucher sur des nouvelles capacités d'adaptation. En conséquence, après cette première description des pratiques d'acteur, il est recommandé d'essayer d'en extraire les activités de bases pour les mettre à disposition des agents informatiques. Lors du déroulement de la simulation, ils évoluent alors plus librement, sans un contrôle forcé de l'enchaînement de leurs activités. Si on retrouve par simulation, des conduites évolutives cohérentes, on aura alors beaucoup progressé dans la compréhension du système étudié. On pourra alors mieux utiliser le modèle pour tester des situations alternatives ou pour expérimenter ses réactions face à des événements environnementaux. Une illustration de cette démarche est présentée sur le modèle TransAmazon au chapitre 12).

4.6 DISCUSSION : LA SIMULATION ET SES CONSEQUENCES POUR LA "VALIDATION" DES SYSTEMES MULTI-AGENTS

Le chapitre 1 s'attachait au problème de l'évaluation des modèles pris dans un sens général. Les conclusions que j'en tire sont donc aussi valables pour les modèle multi-agents : il est préférable de parler d'évaluation plutôt que de validation qui semble trop chargé de présupposés. L'évaluation d'un modèle dépend de l'objectif et de la question à l'origine du processus de modélisation. Et quoi qu'il en soit, celle-ci relève davantage de son absence de réfutation plutôt que de quelques corroborations à des données empiriques. Aussi, l'ajustement d'un modèle à un jeu de données permet dans le meilleur des cas d'augmenter notre confiance dans le modèle, mais en aucune manière de décider de la véracité de ce modèle. On conçoit ainsi pourquoi l'absence de validation (forte) reprochée aux SMA devrait s'appliquer à l'ensemble des modèles. Mais il faut néanmoins comprendre ce qui fait la spécificité des SMA vis-à-vis de la question de l'évaluation et pourquoi le statut d'instrument scientifique leur est parfois refusé.

4.6.1 Importance de distinguer "modèle", "simulation" et "simulateur"

«Simulation is a third way of doing science» [Axelrod, 1997].

Comme il a été souligné au début de ce chapitre, certaines définitions font un amalgame entre modèle et simulation. Or il est important de distinguer ces deux termes car les écarts entre le modèle et le simulateur peuvent être considérables.

Un modèle représente la structure conceptuelle d'un système observé, c'est-à-dire la structure des agents et des autres entités ainsi que les relations qui lient les composants au niveau de l'organisation. Il décrit également les comportements individuels, c'est-à-dire les mécanismes de changement d'état ainsi que la façon dont les activités se succèdent au cours du temps.

De son côté, le simulateur correspond à l'implémentation de ce modèle sur une machine ce qui permet de l'exécuter. "Un simulateur désigne ainsi tout système de calcul capable d'exécuter le modèle de manière à générer son comportement" [Michel, 2004]. Or, comme le soulignent [Edmonds & Hales, 2003], seul le modèle conceptuel sert à expliquer le phénomène observé :

"This conceptual model mediates between the simulation and the phenomena, the purpose of the simulation is to inform the conceptual model, but it is only the conceptual model which directly represents the phenomena". [Edmonds & Hales, 2003]

La phase de codage peut être assimilée à une traduction plus ou moins fidèle du modèle³⁹ conceptuel vers un langage informatique. Le simulateur, au sens de [Zeigler et al., 2000]³⁹, est un logiciel complet qui peut être initialisé et qui peut tourner sur une machine⁴⁰. La relation qui le lie à son modèle s'appelle la "relation de simulation". D'après Zeigler, séparer les concepts de modèle et de simulateur procure de nombreux bénéfices⁴¹ qu'il énumère ainsi :

- Un même modèle peut être exécuté par différents simulateurs, ce qui définit ainsi sa portabilité à un haut niveau d'abstraction.
- Les algorithmes mis en œuvre dans les simulateurs peuvent être étudiés en tant que tels et leur validité peut donc être établie.
- Les ressources nécessaires pour simuler correctement un modèle donnent une mesure de sa complexité.

Or dans le domaine encore récent des SMA, faire cette distinction me semble réellement indispensable. On parle trop souvent des résultats d'un modèle en faisant référence à ceux de son implémentation. Pourtant, sans même en avoir conscience, la distance entre le modèle conceptuel et le simulateur peut être très importante. La traduction du modèle peut s'avérer être une véritable trahison. Non pas que le codeur ait délibérément trahit la pensée du concepteur, mais bien parce que cet exercice présente de nombreux pièges qui, s'ils sont mal traités, peuvent produire des écarts importants entre les résultats d'une simulation et les conclusions qu'on en déduit pour le modèle : les résultats peuvent être liés à des paramètres qui ne sont pas ceux que l'on a présentés. Fabien Michel a nommé ce problème, le *phénomène de divergence implémentatoire* [Michel 2004].

4.6.2 Vérification et "validation" : "Building the model right" et "Building the right model"

Une distinction maintenant classique consiste à différencier la vérification de la validation des SMA [Balci, 1998], [Manson, 2002], [Parker et al., 2003]. La vérification s'attache à juger de la bonne réalisation du simulateur, c'est-à-dire de l'implémentation sans défaut d'un modèle sur une machine. Selon Osman Balci, il s'agit de vérifier "la transformation de la formulation d'un problème en une spécification adéquate ou de tester la conversion d'un modèle sous forme de flowchart en un programme informatique exécutable" sensé être une traduction du modèle conceptuel. En d'autres termes, il s'agit de savoir si on a bien construit le modèle :

"Building the model right" [Balci, 1998]

La "validation", elle, consiste à évaluer la pertinence du modèle; "à prouver si, dans son domaine d'applicabilité, il se comporte avec une justesse satisfaisante en accord avec ses objectifs". Toujours selon Balci, il s'agit de comparer le comportement du modèle avec le système réel qu'il est sensé représenter. Si la comparaison est satisfaisante, la "validation" serait avérée. En d'autres termes, on cherche à savoir si on a construit le bon modèle :

"Building the right model" [ibid.].

Je ne reviendrai pas ici sur mes réticences vis-à-vis de cette façon de considérer la validation d'un modèle (chap. 1). Par contre, en accord avec cette séparation entre vérification et "validation", on comprend bien l'intérêt de distinguer le modèle du simulateur : la question de la "validation" se pose pour le premier tandis que la vérification se pose pour le second.

³⁹ Zeigler a introduit cette notion dans la deuxième édition de son livre [Zeigler et al. 2000].

⁴⁰ Que le modèle soit implémenté directement sur un langage cible ou sur une plate-forme de simulation, cela ne change rien : dans les deux cas, le produit délivré s'appelle un simulateur.

⁴¹ [Gilbert, 1998] explique également que «It is useful to make distinctions between the model as something that is capable of running, the simulation as a running model and the specification as a description of the model».

Dans sa thèse, Thomas Meurisse s'appuie sur cette séparation vérification / validation ainsi que⁹² sur la classification des pratiques de la modélisation décrite par Bruce Edmonds⁴² [Edmonds, 2000a] qu'il décline à travers une proposition de cadre méthodologique. Il subdivise les étapes de la modélisation qu'il répartit en 3 rôles [Meurisse, 2004] :

1. le thématicien conçoit le *Modèle du domaine* c'est-à-dire une abstraction du phénomène
2. le modélisateur fournit le *Modèle de conception* sensé lever les ambiguïtés dans la description du modèle du domaine, et
3. l'informaticien propose le *Modèle opérationnel* (indépendant de tout langage informatique) qui "sert de base opérationnelle à toute solution informatique".

A ces trois rôles sont associés trois étapes : *résultats*, *analyses* et *interprétations* dont l'ordonnancement "correspond à une « généralisation » des résultats fournis par l'outil de simulation" [ibid.]. La figure suivante, proposée par Meurisse à partir de [Vanbergue & Meurisse, 2002] et [Vanbergue, 2003], décrit ce cadre méthodologique. Il permet de repérer les phases liées à la vérification de celles liées à la "validation". Chaque phase est composée de deux sous-phases (interne et externe) :

- la vérification interne consiste à contrôler l'implémentation du simulateur, c'est-à-dire le "debuggage" du programme informatique;
- la vérification externe établit la cohérence entre le modèle opérationnel et l'implémentation en étudiant les résultats bruts des simulations. Selon [Parker et al., 2003], "the main idea is that you must test out your model rules methodically to make sure they are doing what you intend them to do";
- la "validation" interne établit la cohérence entre le modèle de conception et les résultats obtenus par l'ensemble des simulations. Elle permet alors de rechercher et d'identifier les propriétés du modèle comme sa robustesse ou ses réponses sur l'espace des paramètres (chap. 8);
- la "validation" externe correspond à l'évaluation de l'adéquation entre le modèle et le phénomène étudié. Toutes les discussions du chapitre 1 sur la "validation" des modèles en général touchent en définitive à cette dernière phase.

⁴² B. Edmonds propose une classification des pratiques pour la conception et l'exploitation de simulations : (1) produire une abstraction (Establishing an Abstraction), (2) documenter une proposition de conception (Documenting a Design Proposal), (3) explorer le comportement d'une abstraction (Exploring the behaviour of an abstraction), (4) suggérer des solutions à un problème réel (Suggesting Solutions to Real Problems) et (5) rédiger des articles méthodologiques (Methodological Papers).

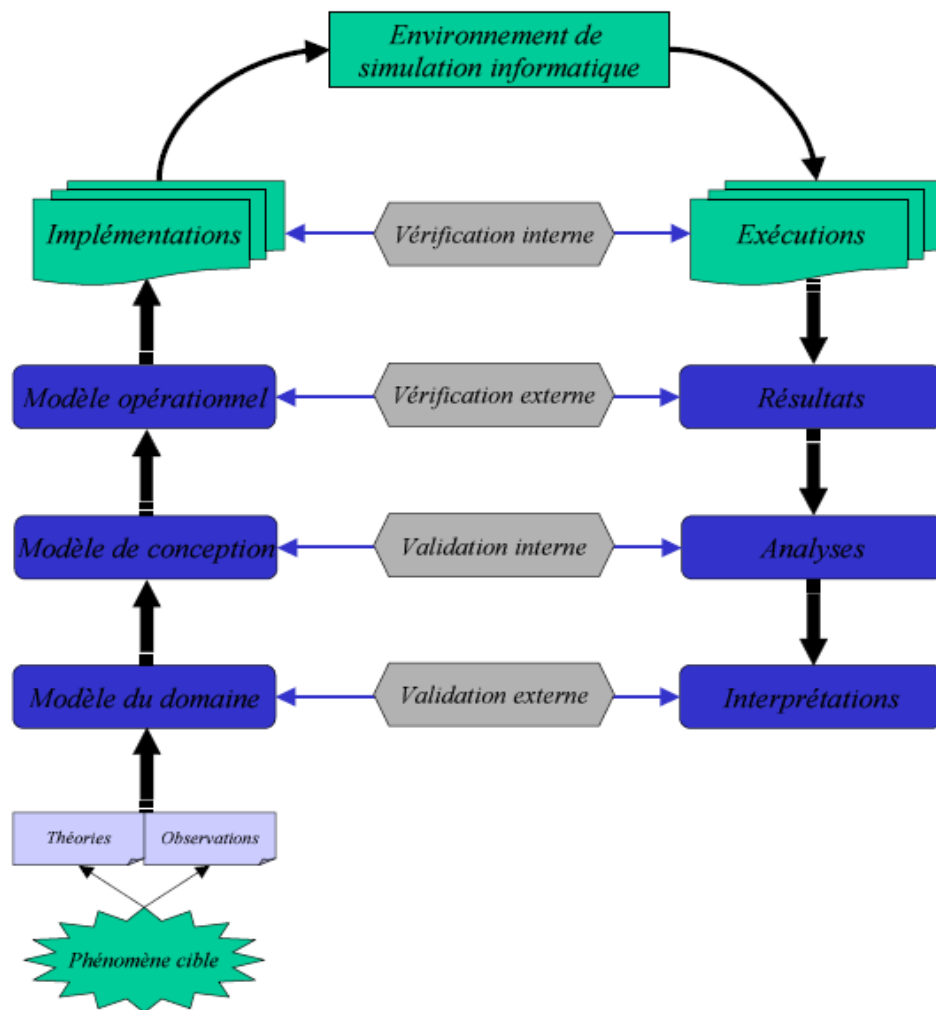


Figure 4-3 : La vérification et la validation, d'après [Meurisse, 2004].

Evidemment la frontière entre vérification externe et validation interne semble difficilement discernable comme le reconnaît [Vanbergue, 2003]. D'ailleurs l'analyse de la structure (voir chapitre 8.1) par exemple qui cherche à vérifier la cohérence des comportements individuels, peut s'apparenter aussi bien à la vérification qu'à la "validation". Néanmoins, la distinction des phases de la modélisation multi-agent ainsi que la séparation modèle / simulateur permettent de discerner les zones sensibles particulièrement susceptibles de générer des divergences entre des résultats de simulation et leurs interprétations vis-à-vis d'un modèle conceptuel.

4.6.3 Fiabilité du simulateur

Comme je l'ai souligné à plusieurs reprises, il est impossible, à l'heure actuelle, de démontrer les propriétés d'un SMA. On peut ne peut que constater un résultat en faisant tourner une simulation. En outre, on peut à juste titre être sceptique sur la fiabilité de ce résultat, car rien ne garantit qu'il découle uniquement des mécanismes que l'on pense avoir élaborés dans le modèle conceptuel.

Comme de fait, il y a de nombreuses possibilités de faire apparaître des artefacts. Ceux-ci peuvent provenir d'erreurs de programmation (codage) ou de calcul (modèle opérationnel), de la qualité du générateur de variables aléatoires (modèle opérationnel), ou d'une gestion approximative du temps de la simulation et des interactions entre agents (modèle opérationnel et modèle de conception). Ces artefacts ne sont donc pas forcément liés à un mauvais codage du simulateur mais peuvent provenir d'approximations dans la chaîne de traduction qui consiste à passer du modèle du domaine au simulateur.

Etant donné que ces artefacts peuvent facilement provenir des modèles opérationnel et de conception, nous nous attacherons dans la deuxième partie de la thèse à prévenir ce problème en approfondissant la question de la gestion du temps des SMA ainsi que celle relative à l'autonomie et à la protection des données internes aux agents. Car la modélisation du temps et le traitement de la simultanéité des actions et des interactions apparaissent comme des points hypersensibles des simulations multi-agents. Or la sensibilité des simulateurs à ces aspects est souvent sous-estimée. D'ailleurs, leur traitement permet d'interroger en retour le modèle du domaine. Ce dialogue entre les concepteurs favorise alors un enrichissement du processus de modélisation. En complément de l'explicitation des traitements du temps et des interactions, des analyses détaillées et exploratoires permettent de vérifier la fiabilité du simulateur.

4.6.4 Réplication et alignement de modèles

Comme il a été présenté au chapitre 1, "l'alignement de modèles" (ou "docking") qui consiste à confronter les résultats de modèles conçus indépendamment, est également un aspect de l'évaluation qu'il ne faut pas négliger.

Dans [Axtell et al., 1996], les auteurs (qui sont à l'origine du terme docking) ont ainsi comparé une adaptation de Sugarscape⁴³ au modèle d'Axelrod traitant des transmissions culturelles d'une société d'agents [Axelrod, 1995]. A la lecture de cet article, on s'aperçoit que les travaux décrits par les auteurs s'apparentent plus à la réplication de modèles qu'à la seule comparaison de leurs résultats. Or, la réplication, non traitée en 1996, devient à l'heure actuelle un sujet délicat mais essentiel dans le domaine des SMA et qui sera abordé au chapitre 9.1. Je l'identifie à une phase décisive de la vérification des modèles qui consiste à retrouver des résultats à partir de spécifications. En d'autres termes, il s'agit de ré-implémenter un simulateur en partant de la description publiée du modèle du domaine ou du modèle de conception. Une réplication avérée joue alors le rôle de vérification d'un SMA.

En ce qui concerne les questions d'alignement, les auteurs s'interrogent notamment sur la façon de qualifier l'équivalence de leurs modèles. Ils cherchent en particulier à établir les différences constatées, à savoir si des résultats équivalents sont produits dans des conditions équivalentes et à démontrer les conséquences de l'abandon de ces conditions équivalentes. Ils proposent par ailleurs

⁴³ Sugarscape est un modèle multi-agent qui représente "la croissance de sociétés artificielles". Il a donné lieu à un livre [Epstein & Axtell, 1997] très fameux qui fait date au sein de la recherche en simulation multi-agent. L'objectif des auteurs est de montrer qu'il est possible d'expliquer de nombreux concepts venant des sciences sociales via des simulations basées sur des modèles relativement simples. Ils posent ainsi le problème: "*How does the heterogeneous micro-world of individuals behaviors generate the global macroscopic regularities of the society?*" [ibid.].

Sugarscape est basé sur la distribution spatiale de ressources en sucre et en épices qui se renouvellent selon des règles simples. Des agents appelés "Citizen" utilisent ces ressources. Dans les simulations de base, les agents perçoivent et se déplacent vers les meilleurs endroits pour collecter du sucre qu'ils absorbent pour contrer les effets de leur catabolisme. Le monde virtuel que les auteurs ont développé permet d'expérimenter diverses hypothèses sur l'apparition de structures sociales émergentes telles que les phénomènes de migrations, les échanges commerciaux, les crises et les guerres. A travers des représentations simples, les auteurs cherchent donc à expliquer des phénomènes sociaux complexes :

« Perhaps one day people will interpret the question, "Can you explain it?" as asking "Can you grow it? " Artificial society modeling allows us to "grow" social structures in silico demonstrating that certain sets of microspecifications are sufficient to generate the macrophenomena of interest. Indeed, it holds out the prospect of a new, generative, kind of social science » [ibid.]

Une des raisons du succès de Sugarscape réside dans la simplicité du modèle et dans la facilité d'en reproduire les résultats. D'ailleurs, de nombreuses ré-implémentations et adaptations de Sugarscape ont été réalisées. Certaines sont présentées à différents moments de cette thèse.

Un environnement spatialisé, le renouvellement de ressources et leur utilisation par des agents capables de les percevoir localement, fondent également les principes qui ont guidé le développement de Cormas.

trois catégories d'équivalence qu'ils classent ainsi : (i) identité numérique (reproduction précise⁹⁵ des résultats), (ii) équivalence distributionnelle (équivalence statistique) et (iii) équivalence relationnelle" (équivalence qualitative) (voir [Axelrod, 1997] et chapitre 9.1.6). Ces catégories d'équivalence peuvent tout à fait s'appliquer à la réplique de modèles.

4.6.5 La lisibilité des modèles multi-agents

La difficulté à répliquer un simulateur est évidemment à rattacher au manque de lisibilité des modèles multi-agents. En effet, il est nécessaire de fournir une description claire et concise pour expliquer un modèle et transmettre un discours. Pour permettre la réplique, le modèle conceptuel doit être compréhensible par tous et doit lever les ambiguïtés concernant entre autre la gestion du temps et le traitement des actions et des interactions. La mise à disposition des sources du simulateur ne suffit pas car elles n'offrent pas une vision synthétique du modèle. Et surtout parce que ce n'est pas le code source qu'il faut répliquer. Il faut au contraire pouvoir reproduire des résultats à partir de l'essence même du modèle, c'est à dire à partir du modèle conceptuel. Même si une parfaite explicitation du modèle reste un idéal, il est indispensable de clarifier le propos et de lever les ambiguïtés en mettant la lumière sur les aspects les plus importants du modèle. Cette question sera traitée au chapitre 9.

4.6.6 Traçabilité et robustesse du modèle

Pour évaluer un modèle multi-agent, l'analyse des résultats macroscopiques n'est pas suffisante. Un ajustement correct à des données ne signifie pas forcément un modèle pertinent. Un des intérêts de l'approche SMA, est de vérifier la crédibilité des comportements individuels. Cette exploration fine du simulateur contribue à révéler les mécanismes explicatifs qui participent à l'émergence du phénomène global. Le modèle doit donc nous apporter des informations (sa traçabilité [Rouchier, 2006]) sur son comportement global à partir de ses mécanismes fins, afin de pouvoir expliquer les changements de direction et déterminer les points sensibles, sujets à bifurcations.

Par ailleurs, pour bien comprendre les tenants et les aboutissants de ces mécanismes, une exploration par analyse de sensibilité est obligatoire (cf. chap. 8). Elle permet de tester la sensibilité du modèle aux paramètres et par là même de tester la robustesse de ses résultats. Car l'hypersensibilité affaiblit un modèle, puisque ses résultats dépendent uniquement de la valeur des paramètres et des conditions initiales. Ils permettent de dire tout et son contraire. Par contre, si les réponses apparaissent à la fois pertinentes et robustes aux changements, alors le concepteur aura su saisir les caractéristiques importantes de son objet d'étude. Il me semble donc plus essentiel de montrer la robustesse d'un SMA plutôt qu'une corrélation fine à des données par ajustement précis de ses paramètres. D'ailleurs, cette analyse n'oblige pas à utiliser des données, mais à montrer que le simulateur mime les grandes tendances ou qu'il permet de détecter les changements de phase. Aussi, montrer la robustesse d'un modèle en indiquant les zones de stabilité permet de généraliser les résultats, d'expliquer des tendances et de prévoir certaines évolutions; autrement dit, d'être plus réfutable.

4.6.7 Autonomie et modèle Ad Hoc

Pour reprendre ce qui a été énoncé au premier chapitre et confirmé par ce qui vient d'être développé, un bon modèle n'est pas un modèle qui "colle" aux données. Une bonne corrélation avec des données peut provenir d'un facteur externe non pris en compte ou être le fruit du hasard. De plus, si les données utilisées pour calculer cette corrélation ont aussi servi à calibrer le modèle, alors il s'agit d'une imposture. Mais il n'est pas rare de trouver des articles énonçant la "validité" d'un modèle par l'adéquation à un seul jeu de données qui a souvent servi à sa calibration. Ainsi en "câblant" les comportements des agents c'est-à-dire en les calquant de façon figée sur une séquence observée, on obtient rapidement un modèle *ad hoc* : un modèle-film qui ne nous apprend

rien d'autre que ces observations initiales. Certes, il peut être intéressant d'introduire dans un modèle des variables de forçage (variables dont les valeurs ne dépendent pas du modèle mais sont fournies de façon imposée, par exemple pluviométrie ou prix d'une denrée), mais elles jouent alors de rôle de variables externes qui perturbent l'environnement et les agents. L'intérêt est alors de tester les facultés d'adaptation de ces derniers à ces perturbations. Ainsi, au lieu de décrire des comportements figés sur une séquence préétablie d'activités, il est préférable de concevoir des agents les plus autonomes possibles (cf. chap. 6) pour répondre de façon appropriée et flexible à des modifications de leur environnement.

4.7 CONCLUSION DU CHAPITRE

Il n'est pas nécessaire de concevoir des modèles complexes présentant un haut degré de réalisme. Car le but principal de la modélisation multi-agent n'est pas de mimer la réalité ni d'en simplifier la complexité, mais plutôt d'essayer de la comprendre [Edmonds, 2000a]. Plutôt que de chercher à tendre vers un réalisme illusoire, il est plus important d'essayer de trouver les mécanismes élémentaires qui caractérisent le système et en dirigent les grandes tendances. Dès lors, si on pense avoir saisi ces mécanismes, la simulation, qui déroule le temps, en dévoile l'importance en les mettant en action et en faisant interagir les entités du système. La simulation fait ainsi émerger une complexité qui n'est pas explicitement formalisée par le modèle conceptuel.

D'ailleurs si les propriétés émergentes paraissent surprenantes au premier abord, il est indispensable d'en comprendre les raisons pour en tirer une explication. Toutefois, il n'est pas toujours évident d'expliquer un résultat car il est difficile de synthétiser une simulation. Ainsi, comme le dénoncent [Lobry et Elmoznino, 2000], l'absence de preuve des propriétés générales d'un modèle entraîne des inconvénients qui peuvent affecter les SMA.

De plus, il n'y a pas de certitude à ce qu'un résultat découle uniquement des mécanismes issus du modèle. De nombreuses sources d'erreurs ou de biais peuvent avoir été introduits par mégarde lors du passage du modèle conceptuel à son implémentation en un simulateur. Ce "phénomène de divergence implémentatoire" [Michel 2004] peut être à l'origine d'écarts importants entre les résultats d'une simulation et les conclusions qu'on en déduit pour le modèle. Ainsi, c'est moins l'absence de preuve des propriétés d'un modèle que le manque de fiabilité d'un simulateur, qui fragilise le domaine de la modélisation multi-agent.

Par conséquent, la compréhension de ce que produit un simulateur est une condition *sine qua non* pour s'assurer de son bon fonctionnement et pour vérifier sa connexion sans faille avec le modèle conceptuel. S'il est encore impossible de prouver les propriétés d'un SMA, une des clés de sa fiabilité repose sur l'assurance que le modélisateur garde le contrôle du simulateur, c'est à dire qu'il en maîtrise tous les tenants et les aboutissants. Parce qu'il contrôle complètement son système, il doit être capable d'en expliquer tous les résultats. En d'autres termes (et pour faire un parallèle avec la fiabilité de la filière bovine !), il doit pouvoir montrer la traçabilité d'un résultat en déroulant la chaîne des événements à partir des mécanismes élémentaires du modèle [Rouchier, 2006].

Enfin, la fiabilité de ces résultats sera renforcée si d'autres personnes sont capables de répliquer le simulateur à partir de ses spécifications et de retrouver des propriétés similaires. Or ceci implique une bonne lisibilité du modèle qui doit lever toutes les ambiguïtés en mettant la lumière sur ses aspects les plus sensibles, en particulier sur la gestion du temps et sur le traitement des actions et des interactions.

La suite de cette thèse a pour objectif de faire connaître les points sensibles de la modélisation multi-agent. Elle aborde certains aspects des problèmes liés à la vérification. Elle cherche à donner des pistes pour construire correctement un modèle plutôt que de construire le bon modèle, même si ces deux notions sont étroitement liées.

DEUXIEME PARTIE :

LES ARTEFACTS LIES A LA GESTION DU TEMPS ET DES INTERACTIONS

Chapitre 5

GESTION DU TEMPS DANS LES SIMULATIONS

5.1 LES TEMPS

La notion de simulation est indissociable d'une représentation du temps. [Fianyo, 2001] et [Fianyo et al., 1998] distinguent 3 types de temps :

- Le temps *réel* (ou temps *physique*) des phénomènes que l'on observe.
- Le temps *virtuel* (ou temps de *simulation*) qui correspond à une représentation du temps réel que l'on cherche à simuler; par exemple, "chaque unité de temps représentant une semaine de temps de la réalité" [ibid.]
- Le temps *computationnel* (ou temps de *calcul*) qui correspond au temps d'exécution d'une simulation et qui est lié à la rapidité de l'ordinateur.

Les applications appelées "temps-réel" cherchent à confondre le temps réel avec le temps virtuel. Ce sont souvent des applications à but d'entraînement dans lesquelles les hommes sont plongés dans un environnement virtuel pour apprendre à gérer des situations difficiles (simulateurs de vols, simulateurs d'incendies, etc.).

Dans le domaine de la modélisation et de la simulation, avant même de s'attacher aux problèmes de performances, le temps virtuel est évidemment le point le plus important sur lequel il faut se concentrer. Les systèmes dynamiques de façon générale proposent plusieurs moyens de représenter l'écoulement du temps. [Amblard & Dumoulin, 2004] en distinguent trois types : le temps continu, le temps discret et l'approche à événements discrets. Pour étudier les diverses manières de les simuler nous présentons différents types de modèles : les modèles mathématiques à dynamiques continues et à dynamiques discrètes puis les modèles multi-agents à dynamiques événementielles et à dynamiques séquentielles.

5.2 TEMPS DISCRET ET TEMPS CONTINU DES MODELES MATHEMATIQUES

Ce paragraphe présente succinctement les modèles mathématiques à travers deux types de représentation du temps, continu et discret. A partir de là, je développerai la question de savoir s'il faut utiliser ou non une gestion discrète du temps et quels peuvent être les biais liés à cette discrétisation.

5.2.1 Modèles à temps continu

Les modèles à temps continu considèrent l'écoulement du temps comme un phénomène continu où les variables d'état d'un système évoluent de façon lissée, même si par moments des à-coups peuvent survenir. Selon la classification de [Zeigler et al. 2000], ces modèles appartiennent à la famille des modèles DESS (Differential Equation System Specification). En effet, pour représenter les variations des variables, on utilise des équations différentielles de type :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$

pour lesquelles, l'état d'un système à un instant t est donné par t et un vecteur x : $x_t = (a_t, b_t, \dots)$. A partir des outils mathématiques, on peut résoudre ces systèmes d'équation pour en étudier les

caractéristiques générales. La force des mathématiques repose alors sur une formulation non-ambiguë des concepts du modèle et sur la possibilité d'en *prouver* les caractéristiques globales (convergence vers un état d'équilibre, régime cyclique ou chaotique, identification des zones d'état du modèle, identification des seuils, etc.) sans avoir besoin de faire tourner les simulations sur toutes les configurations possibles.

5.2.2 Exemple de modèle à temps continu : le modèle de Verhulst

Pierre-François Verhulst, mathématicien belge a décrit en [1838] un modèle de dynamique des populations. Ce modèle est également connu sous le terme de modèle logistique continu. Ici, le temps et la taille de la population sont continus: ils sont tous deux représentés par des nombres réels. Même si le nombre d'individus devrait être considéré comme un entier, on peut admettre qu'à l'échelle d'une population ce nombre soit un réel. Une des hypothèses de ce modèle repose sur l'idée que pour de faibles variations de temps, l'accroissement de la population est proportionnel au temps et à la taille de la population.

$$\frac{dx}{dt} = R \cdot x$$

Ici, X représente la taille d'une population et R , son facteur de croissance.

Ce premier modèle a été conçu par Malthus en 1798⁴⁴ pour modéliser la croissance de la population humaine. La *solution* par intégration de cette équation différentielle donne :

$$X_t = X_0 \cdot e^{R \cdot t}$$

Elle décrit une croissance exponentielle de la population avec le temps. Or si on constate qu'une population peut croître de façon exponentielle pour de faibles effectifs, dans les faits, la croissance d'une population est limitée et R ne peut pas être considéré comme constant. Verhulst introduit alors une contrainte de l'environnement qui ne peut accepter une population infinie. Il propose alors d'envisager R comme une fonction décroissante de X :

$$R(x) = r \cdot \left(1 - \frac{x}{K}\right)$$

où r est appelé taux intrinsèque de croissance et où K représente la capacité de charge que peut supporter le milieu. Ainsi le facteur de croissance est positif ou négatif selon la taille de la population. L'équation logistique continue de Verhulst s'écrit donc :

$$\frac{dx}{dt} = r \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{K}\right) \quad (1)$$

et sa *solution* par intégration est⁴⁵ :

⁴⁴ Le Révérend Thomas Robert Malthus (1766-1834) fut l'initiateur de la démographie avec sa célèbre théorie des populations. Economiste britannique, il observait la tendance de croissance exponentielle de la population humaine. En supposant que la production agricole n'augmenterait que linéairement il *prédisait* une augmentation de la misère humaine et proposait donc un contrôle de la natalité humaine, surtout à l'égard des familles pauvres... dans leurs propres intérêts évidemment.

⁴⁵ Pour résoudre cette équation différentielle, il faut l'intégrer sur l'intervalle $t_0 - t$ pour des valeurs respectives de x

$$\text{égales à } x_0 \text{ et } x_t : \frac{dx}{dt} = r \cdot x \cdot \left(1 - \frac{x}{K}\right) \Leftrightarrow \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{K}\right)} = r \cdot dt \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_t} \frac{dx}{x \cdot \left(1 - \frac{x}{K}\right)} = \int_0^t r \cdot dt$$

$$\Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_t} \frac{K}{x(K-x)} \cdot dx = [r \cdot t]_0^t \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_t} \frac{K-x+x}{x(K-x)} \cdot dx = r \cdot t \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_t} \left(\frac{1}{x} + \frac{K}{K-x}\right) dx = r \cdot t \Leftrightarrow [\ln(x)]_{x_0}^{x_t} - [\ln(K-x)]_{x_0}^{x_t} = r \cdot t$$

$$f(x, t) = x_t = \frac{K}{\frac{K - x_0}{x_0} \cdot e^{-r \cdot t} + 1} \quad (2)$$

Grâce à cette solution, on constate que les états du système à l'instant initial x_0 et la fonction f suffisent à caractériser tous les états possibles du système sans avoir besoin de "faire tourner" le modèle pour connaître la valeur de x à un instant t quelconque. La résolution de l'équation logistique continue permet entre autre de *démontrer* que lorsque t tend vers l'infini, toute condition initiale (non nulle) de la population tend vers une situation d'équilibre x^* égale à K .

$$x^* = \lim_{t \rightarrow +\infty} (x_t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\frac{K}{\frac{K - x_0}{x_0} \cdot e^{-r \cdot t} + 1} \right) = K \quad \forall x_0 > 0$$

Les variations de x en fonction du temps montrent une courbe dite sigmoïde qui s'aplatit progressivement vers la valeur K .

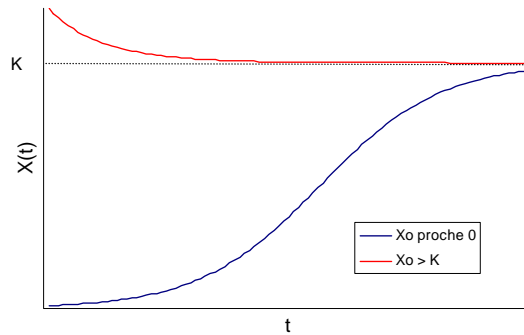


Figure 5-1 : Evolution d'une population selon le modèle de Verhulst. Quelle que soit la valeur initiale, différente de 0, la population tend progressivement vers un état d'équilibre.

En étudiant le profil des phases (c'est-à-dire en traçant la production de nouveaux individus dx/dt en fonction de x), on montre que le modèle logistique continue possède deux points d'équilibre: $x_0^* = 0$ et $x_1^* = K$. x_0^* est un équilibre instable alors que x_1^* est stable.

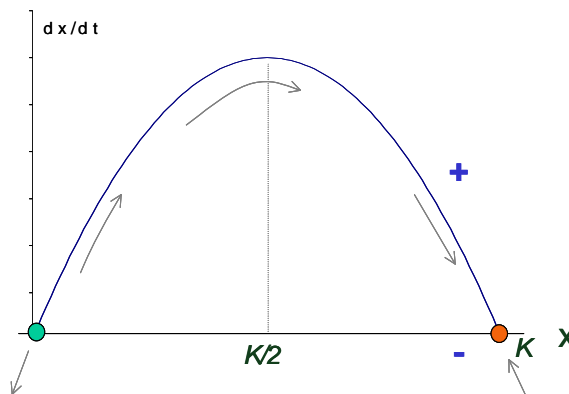


Figure 5-2 : Profil des phases de l'équation logistique. Il révèle deux points d'équilibre, l'un instable (bleu), l'autre stable (orange).

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{x_t}{K - x_t}\right) = r \cdot t + \ln\left(\frac{x_0}{K - x_0}\right) \Leftrightarrow \frac{x_t}{K - x_t} = \frac{x_0}{K - x_0} \times e^{r \cdot t} \Leftrightarrow x_t = \frac{K}{\frac{K - x_0}{x_0} \times e^{r \cdot t} + 1}$$

On montre également que le taux d'accroissement de la population est maximum lorsque sa taille vaut la moitié de K . C'est à cette valeur que la population est la plus dynamique.

En étudiant la production d'un stock halieutique, Schaefer [1957] a utilisé cette propriété du modèle pour définir les rendements maximums que l'on peut espérer d'une pêcherie. Depuis, l'équation logistique est à la base d'un grand nombre de modèles, tant en écologie (modèle proie – prédateur, ECEC) qu'en économie (modèle de Gordon – Schaefer)⁴⁶.

On considère que ces modèles représentent des populations asynchrones car les naissances des nouveaux individus ont lieu de façon aléatoire dans le temps. On les oppose aux populations synchrones où les individus naissent simultanément sur des périodes de temps données.

L'annexe 1 (page 288) présente un exemple de modèle mathématique à temps continu (le modèle de Lotka-Volterra) pour lequel il n'existe pas de résolution analytique complète. Il est nécessaire de faire des approximations importantes pour résoudre le système d'équations, sinon on est obligé de faire tourner des simulations pour en étudier la dynamique.

5.2.3 Modèles à temps discret : Systèmes dynamiques discrets

Pour cette catégorie de modèles mathématiques, on considère que le temps évolue de façon discrète et les variables du système changent par à-coups et simultanément. Ici, le temps évolue par sauts réguliers Δt .

La discrétisation la plus élémentaire d'un modèle continu est obtenue avec les premiers termes du développement de Taylor (ou schéma d'intégration d'Euler) qui utilise les dérivées d'une équation pour estimer localement cette fonction par un polynôme :

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0).(x - x_0) + \frac{f^{(2)}(x_0)}{2!}.(x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}.(x - x_0)^n + o(x - x_0)$$

Le théorème de Taylor donne le développement limité d'une fonction f au voisinage de x_0 . C'est l'écriture d'une fonction sous la forme d'une fonction polynôme et d'un reste. Si l'on se contente d'un développement d'ordre 1, on parle alors d'approximation linéaire :

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0).(x - x_0)$$

ou encore, en introduisant la variable temps :

$$f(t + \Delta t) \approx f(t) + f'(t). \Delta t$$

Cette discrétisation permet d'exprimer l'état du système à l'instant t en fonction de son état à l'instant précédent. Si Δt égale à 1, la fonction $f()$ est dans ce cas une fonction récurrente :

$$X_{t+1} = f(X_t) \quad (3)$$

⁴⁶ Sur la base d'expérimentations menées par des éthologues [Calhoun, 1962] et de données observées en milieu naturel, Edwards T. Hall explique que les fluctuations des populations sont également régies par des phénomènes de régulations intra-spécifiques. Sans aucune limitation de la nourriture présente dans l'environnement (le fameux K), de fortes densités perturbent la régulation de la distance entre les animaux et "lorsque cette distance spécifique n'est pas respectée, ils succombent à l'agression de leurs congénères plutôt qu'à la famine, à la maladie ou à l'attaque des prédateurs" [Hall, 1971]. Il explique que des mécanismes physiologiques de stress dû à la trop grande proximité provoquent des effondrements de la population alors même que le milieu reste suffisamment riche.

5.2.4 Exemple de modèle à temps discret : équation logistique discrète

A partir de l'équation de Verhulst (1), on obtient une équation logistique discrète en effectuant une approximation linéaire :

$$X(t+\Delta t) \approx X(t) + \Delta t \cdot rX(t) \cdot \left(1 - \frac{X(t)}{K}\right) \quad (4)$$

Le graphique suivant montre plusieurs simulations de l'équation logistique discrète (4) pour différentes valeurs de Δt que l'on compare avec la fonction continue (2).

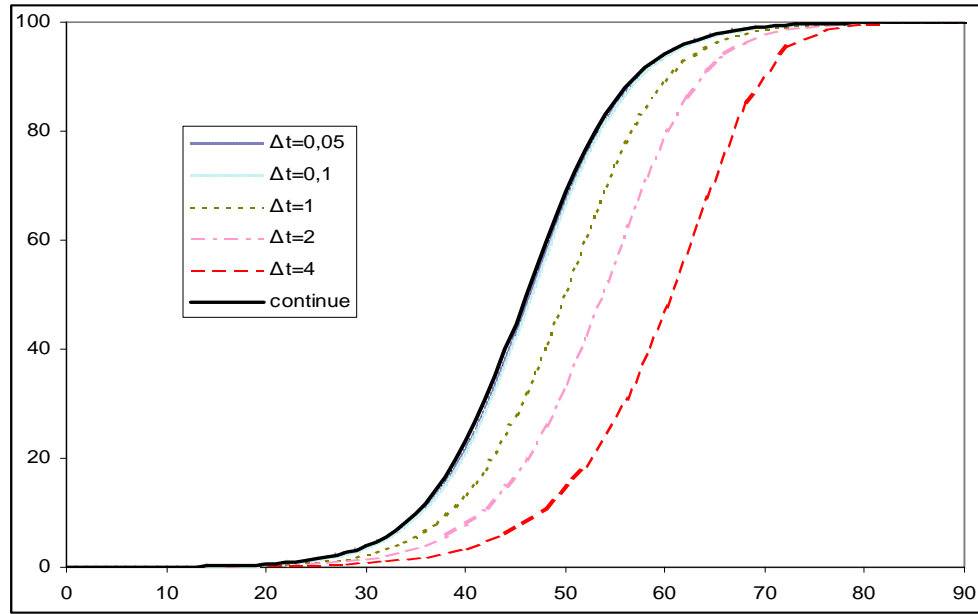


Figure 5-3 : Simulations de l'équation logistique discrète (4) à divers Δt et comparaison avec le modèle continu de Verhulst. Ici, $K=100$; $r=0,2$; $X_0=0,01$

On remarque évidemment que plus Δt tend vers zéro, meilleure est la qualité de l'approximation. En posant $\Delta t = 1$, on obtient alors la fonction récurrente suivante :

$$X_{t+1} = X_t + rX_t \cdot \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) \quad (5)$$

Cette fonction récurrente (5) constitue une approximation correcte de la fonction continue (1). Or, un siècle après Verhulst, l'étude de cette fonction récurrente a conduit à la découverte de la théorie du chaos déterministe (voir explication et historique au chapitre 2.3.2). En effet, on observe que pour certaines valeurs des paramètres du modèle discret, les dynamiques s'avèrent très instables. Dans ce cas, des modifications infimes des conditions initiales ou des paramètres produisent des résultats très différents à moyen terme. L'exemple de la figure suivante illustre cette sensibilité : à partir de l'équation récurrente (5), dont les paramètres K et r sont fixés respectivement à 100 et 3, un écart de 10^{-5} sur la valeur initiale conduit dans un premier temps à des résultats similaires, puis à des réponses totalement différentes à moyen terme.

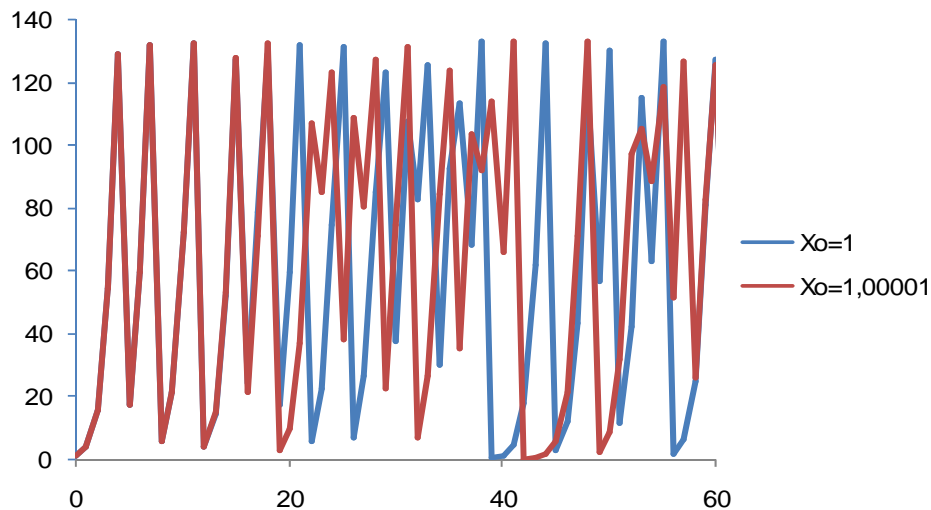


Figure 5-4 : Exemple de sensibilité aux conditions initiales. Deux résultats de simulation de l'équation récurrente (2) pour deux conditions initiales très proches ($X_0 = 1$ et $X_0' = 1,00001$; $\Delta = 10^{-5}$) montrent rapidement des divergences importantes. Pour certaines valeurs des paramètres (ici $K=100$, $r=3$), ce modèle déterministe s'avère indéterminé.

Par conséquent pour certaines valeurs de ses paramètres, l'équation logistique récurrente, apparemment si simple, peut exhiber des comportements chaotiques. Le système reste déterministe et pourtant il devient non prédictible à moyen terme.

5.2.5 Alors... discret ou continu ?

En faisant abstraction du monde de l'infiniment petit qui révèle des processus quantiques, on considère généralement qu'à notre échelle, le temps semble s'écouler de façon continue. Néanmoins, le temps d'un modèle à temps discret peut être vu comme étant associé à des mesures effectuées sur un système à temps continu dont on observe l'évolution à intervalles réguliers⁴⁷. D'autre part, il existe bien des phénomènes discrets. Par exemple, en dehors du fait qu'elle favorise une approximation de la fonction continue, l'équation logistique discrète garde toute sa justification en écologie pour décrire la dynamique d'une population qui se reproduit de façon synchronisée une fois par an.

Mais si on considère le phénomène comme étant continu, alors il faut faire très attention à la façon dont on modélise son évolution si on choisit une dynamique "à pas de temps". Dans l'exemple de la fonction logistique, la comparaison des dynamiques entre le modèle de Verhulst, continu, et le modèle logistique discret montre que cette discrétisation peut complètement bouleverser la

⁴⁷ Sans rentrer dans des débats philosophiques hors de ma portée, il me faut néanmoins souligner la critique que Bergson fait vis-à-vis du temps des scientifiques qu'il compare à la méthode cinématographique: "Or l'action, avons-nous dit, procède par bonds. Agir, c'est se réadapter. Savoir, c'est-à-dire prévoir pour agir, sera donc aller d'une situation à une situation, d'un arrangement à un réarrangement. La science pourra considérer des réarrangements de plus en plus rapprochés les uns des autres ; elle fera croître ainsi le nombre des moments qu'elle isolera, mais toujours elle isolera des moments. Quant à ce qui se passe dans l'intervalle, la science ne s'en préoccupe pas plus que ne font l'intelligence commune, les sens et le langage : elle ne porte pas sur l'intervalle, mais sur les extrémités." Ainsi, si le mathématicien "divise l'intervalle en parties infiniment petites par la considération de la différentielle dt , il exprime simplement par là qu'il considérera des accélérations et des vitesses, c'est-à-dire des nombres qui notent des tendances et qui permettent de calculer l'état du système à un moment donné ; mais c'est toujours d'un moment donné, je veux dire arrêté, qu'il est question, et non pas du temps qui coule. Bref, le monde sur lequel le mathématicien opère est un monde qui meurt et renaît à chaque instant [...]. Mais, dans le temps ainsi conçu, comment se représenter une évolution, c'est-à-dire le trait caractéristique de la vie ? L'évolution, elle, implique une continuation réelle du passé par le présent, une durée qui est un trait d'union. En d'autres termes, la connaissance d'un être vivant ou système naturel est une connaissance qui porte sur l'intervalle même de durée, tandis que la connaissance d'un système artificiel ou mathématique ne porte que sur l'extrémité." [Berson, 1907]

dynamique pour certaines valeurs des paramètres. On observe dans ce cas des comportements chaotiques qui ne peuvent pas apparaître dans le modèle continu. Si le problème biologique est continu, cette différence a donc de fortes chances d'être un artéfact numérique et non un phénomène biologique. Pour éviter ce piège, on peut moduler le pas de la discrétisation et tester si la dynamique prédite est robuste par rapport à cette modulation (cf. figure suivante).

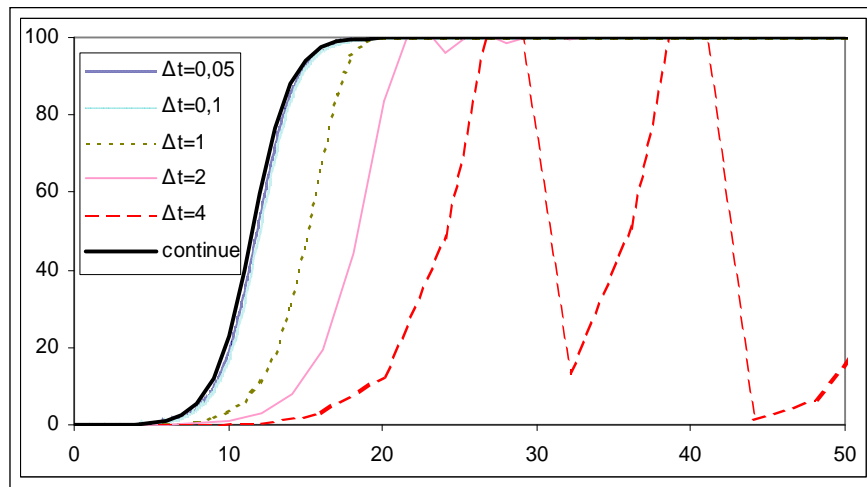


Figure 5-5 : Simulations de l'équation logistique discrète à divers Δt et comparaison avec le modèle continu de Verhulst. Ici, $K=100$; $r=0,8$; $X_0=0,01$. Pour $\Delta t=2$, on observe des oscillations amorties et pour $\Delta t=4$, un comportement chaotique très différent de la courbe sigmoïde du modèle continu.

Toutefois, l'apparition de comportements chaotiques n'est pas uniquement rattachée aux systèmes discrets. Des modèles à temps continu peuvent également exhiber des dynamiques chaotiques. En cherchant à décrire les phénomènes brusques, René Thom a montré qu'un système mathématique continu pouvait produire des résultats discontinus. Il montre qu'après avoir résisté au changement (résilience), un système peut quitter un attracteur pour basculer brusquement vers un autre. Un changement "catastrophique" résulte du conflit entre les deux attracteurs sur un point de tension (appelé point Phi) entre deux variables, l'une lente, l'autre rapide. La théorie des catastrophes⁴⁸ met l'accent sur les discontinuités, mais elle repose sur des dynamiques sous-jacentes lentes et continues :

"La théorie des catastrophes consiste à dire qu'un phénomène discontinu peut émerger en quelque sorte spontanément à partir d'un milieu continu". [Thom, 1991]

Ainsi, selon le niveau d'organisation étudié, des dynamiques peuvent apparaître continues, graduelles ou discrètes.

D'autre part et d'un point de vue technique, les systèmes d'équations différentielles à temps continu sont rarement intégrables. Il est alors fréquent de faire appel à des approximations numériques pour décrire leur comportement. Dans ce cas, le calcul numérique nécessite une discrétisation du système continu. En effet, les mathématiques fournissent des outils pour trouver la solution d'une équation différentielle : méthode de séparation des variables, méthode de modification des variables permettant de résoudre des équations ordinaires (ne prenant en compte que les dérivées dans le temps mais pas dans l'espace) linéaires. Dans certains cas, on peut utiliser la méthode des isoclines qui indique l'évolution qualitative des variables. Mais le plus souvent, ces outils ne suffisent pas. Et souvent, il faut approcher le modèle continu par un modèle discret et employer des méthodes numériques pour simuler des solutions (méthode d'Euler, méthode de Runge-

⁴⁸ La théorie des catastrophes est maintenant considérée comme faisant partie de la théorie du chaos déterministe, mais elle a été développée tout à fait indépendamment par René Thom qui l'a présentée en 1972 dans son ouvrage "Stabilité et morphogenèse structurale".

Kutta)⁴⁹. En décrivant les raisons de la simulation multi-agent, R. Axtell parvient également à cette conclusion [Axtell, 2000]. Il range ces raisons en trois catégories : (a) il existe une solution analytique au système d'équations et alors la simulation ne sert qu'à illustrer des résultats. (b) La résolution ne peut être que partielle : on peut par exemple trouver des solutions seulement pour certaines valeurs de paramètres, ou bien ne résoudre le système qu'en faisant l'hypothèse d'un équilibre. Pour étudier les parties non-résolvables, il faut recourir à la simulation. (c) Le modèle n'a pas de solution (modèle indécidable) ou les outils à disposition ne permettent pas de résolution, et dans ce cas, seules les simulations permettent d'obtenir une série de résultats.

Par ailleurs, les modèles à équations différentielles prennent difficilement en compte les interactions entre composants d'un système. Souvent, elles sont considérées comme continues et réparties de façon homogène dans l'espace. Il est par exemple difficile de prendre en compte des perturbations ponctuelles. Or cette considération s'avère être une hypothèse trop restrictive pour la modélisation des écosystèmes et les systèmes sociaux.

Ainsi, au-delà de la question quasi philosophique de savoir si le temps est continu ou discret, les outils mathématiques à notre disposition nous obligent bien souvent à concevoir des modèles où le temps avance par à-coups. La discrétisation des équations aux dérivées partielles est en effet indispensable car les inconnues, dont les valeurs numériques sont à déterminer grâce aux simulations, sont a priori en nombre infini [Lions, 2003].

Parce qu'elles sont basées sur des processeurs cadencés, les simulations informatiques impliquent également de discrétiser le temps. Les SMA, basés sur les concepts Objets, n'échappent pas à cette règle. Mais, comme nous venons de le voir (figure précédente), ce constat ne doit pas nous empêcher, bien au contraire, de considérer l'évolution temporelle de nos modèles avec le plus grand soin.

5.3 LES POLITIQUES DE GESTION DU TEMPS DES SMA

Les simulateurs multi-agents utilisent deux types d'implémentation pour manipuler des événements discrets : la simulation à "pas de temps" constant, également appelée "simulation par horloge", et la simulation événementielle.

5.3.1 Les modèles à événements discrets : simulation dirigée par les événements

L'approche à événements discrets considère le temps comme une variable continue (un réel). Mais par contre, l'état du système change de façon discrète à des instants précis : les événements. Δt est donc variable. La date d'occurrence des événements est calculée au début ou au cours de la simulation et les événements sont souvent ordonnés dynamiquement dans une liste encore appelée échéancier [Amblard & Dumoulin, 2004]. Pour ces simulations, le temps, considéré comme continu, est représenté par une suite d'événements discrets qui apparaissent à des intervalles variables.

⁴⁹ Les plates-formes de simulation numérique, type Vensim ou Stella, fonctionnent sur ce principe. Elles permettent de simuler des équations que l'utilisateur entre de façon graphique. Mais derrière ces outils graphiques, la procédure consiste à discrétiser automatiquement le temps en utilisant la méthode d'Euler ou de Runge-Kutta. Δt prend par défaut la valeur 0,5. Si cette valeur peut être changée manuellement, on note cependant que le module d'analyse de sensibilité à disposition ne permet pas de mesurer les effets de Δt (cf. figure 5-5). Ainsi donc, même dans le domaine de la simulation numérique, les effets de la discrétisation du temps sont minimisés et nombreux sont les utilisateurs qui n'ont pas conscience de ces conséquences.

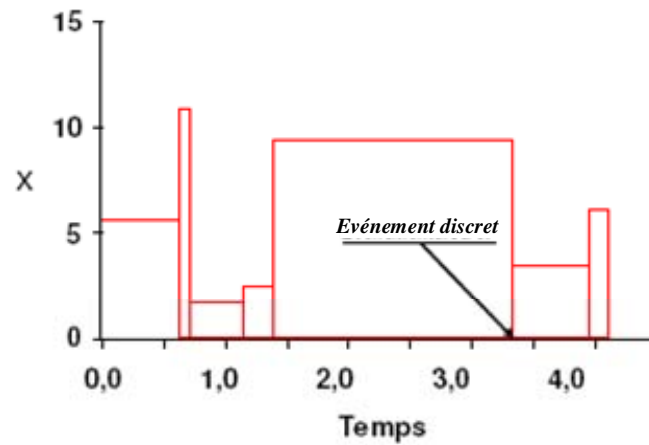


Figure 5-6: Evolution d'une variable dans un modèle événementiel (d'après [Michel, 2004])

Plutôt que de déclencher l'activation de tous les agents à chaque pas de temps, les événements qui déclencheront l'activation de chacun sont rangés au préalable ou en cours de simulation dans une liste chronologique.

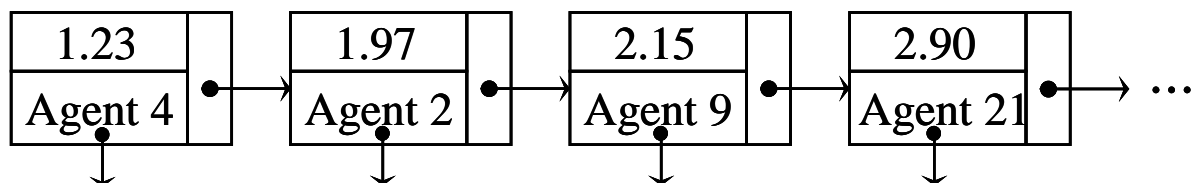


Figure 5-7 : Représentation d'une liste d'événements d'après [Lawson et Park, 2000]. Dans ce qu'ils appellent "a Next-event asynchronous time evolution" le temps global évolue par succession d'événements. Le premier événement de la liste (daté par un réel) est sélectionné. L'horloge globale est alors mise à jour et prend la valeur de la date de l'événement. Celui-ci active l'agent qu'il référence. Puis cet événement est supprimé et on passe à l'événement suivant.

La réalisation de la simulation consiste à sélectionner l'événement en tête de l'échéancier, à mettre à jour l'horloge et à exécuter le changement d'état décrit par l'événement.

Cette gestion du temps peut apporter un avantage en termes de temps de calcul. Lors d'une période d'inactivité des entités, le simulateur avance directement au prochain événement plutôt que de traiter une suite de pas de temps inutiles. Mais de façon générale, comme le constatent [Lawson et Park, 2000], la gestion événementielle s'accompagne souvent de performances faibles des temps d'exécution des simulateurs.

5.3.1.1 Exemple de gestion événementielle : la file d'attente

[Balci, 1988] et [Guessoum, 1996] distinguent trois types de gestion pour l'approche événementielle (approche par événements, par activités et par processus), mais la plus usitée reste l'approche par événements. Pour l'illustrer, on utilise fréquemment l'exemple classique de la file d'attente :

Le système peut être décomposé en trois zones (l'entrée des clients, la file d'attente et le guichet), qui sont parcourues par des clients. Les événements qui entraînent les changements d'état de ce système, peuvent être :

- L'arrivée d'un client venant de l'extérieur (événement extérieur),
- Le début d'une opération de traitement au guichet (événement interne),
- La fin d'une opération de traitement au guichet (événement interne).

La simulation consiste alors en une boucle :

- prendre le prochain événement et le retirer de l'échéancier
- avancer la date de simulation à la date de cet événement

- calculer les changements d'état de l'entité pointée par cet événement
- calculer les nouveaux événements qui sont les conséquences de cet événement, et les insérer dans l'échéancier. Par exemple, l'événement "début de traitement au guichet", est déclenché par le receveur du guichet qui connaît la durée de l'opération de traitement. Il est alors capable d'anticiper le moment où aura lieu la fin de cette opération. Il crée donc un événement "fin de traitement", avec une date qu'il a calculée, et remet cette instance d'événement à l'échéancier. L'échéancier est capable d'insérer les événements en les triant et d'en extraire le prochain (dans l'ordre des dates).

5.3.1.2 Formalisation de Zeigler : DEVS

Il faut ici nous attarder un peu pour décrire succinctement les travaux de B. P. Zeigler et son équipe qui, depuis plus de trente ans, contribuent à l'élaboration d'une théorie de la modélisation et de la simulation (M&S). Bien qu'initié dans les années 70 [Zeigler, 1972], l'ouvrage majeur de Zeigler a été récemment réactualisé dans [Zeigler et al., 2000]. L'objectif de la théorie M&S est de fournir une base méthodologique pour la conception de simulation pris dans un sens général. Le formalisme de base utilisé pour la spécification des modèles événementiels est le *Discrete Event System Specification*, noté DEVS. Il s'abstrait de la mise en œuvre de simulateurs même si des algorithmes sont proposés pour implémenter des modèles. DEVS vise également à intégrer différents formalismes (équations différentielles, réseaux de Petri, etc.) en un seul; on parle dans ce cas de multi-modélisation. A l'exception des travaux pionniers de Uhrmacher [Uhrmacher & Schattenberg, 1998], peu de modèles multi-agents prennent en compte ce formalisme. Et si les thèses récentes de [Duboz, 2004] et [Michel, 2004] promeuvent DEVS, ce formalisme reste encore peu connu de l'ensemble de la communauté multi-agent. Car s'il existe une extension de DEVS à la spécification de simulations multi-agents (DEVS-RAP pour Reactive Action Packages), son utilisation reste encore difficile.

DEVS est basé sur un formalisme d'automates à états finis et s'attache à spécifier les relations entre entités atomiques. En s'inspirant de l'approche systémique, Zeigler propose de représenter un système dynamique de la façon suivante :

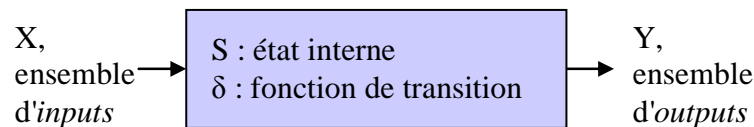


Figure 5-8 : Représentation d'un système dynamique selon Zeigler

Un système dynamique est une boîte noire présentant des ports en entrée et des ports en sortie. Pour un observateur ou une autre entité, il n'est perçu que par ses sorties. Le formalisme DEVS prend en compte deux niveaux : le niveau atomique et le niveau couplé.

- Niveau DEVS atomique

Dans sa forme la plus classique, un modèle DEVS dit "atomique" correspond à la structure suivante :

$$\text{DEVS} = \langle X; Y; S; \delta_{\text{ext}}; \delta_{\text{int}}; \lambda; \tau_a \rangle$$

où :

- X est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports d'entrée (c'est à ce niveau que les événements externes sont reçus),
- Y est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports de sortie (ports à travers lesquels les événements émis par le modèle atomique sont émis vers l'extérieur),
- S est l'ensemble des états du système,
- δ_{ext} est la fonction de transition externe (elle représente la réponse du système aux événements en entrée),

- δ_{int} est la fonction de transition interne (c'est la partie autonome de la fonction de transition),
- λ est la fonction de sortie,
- ta est la fonction d'avancement du temps. Elle représente la durée de vie d'un état s du système lorsque n'intervient aucun événement extérieur.

On peut alors reprendre le graphe de la figure précédente de la façon suivante :

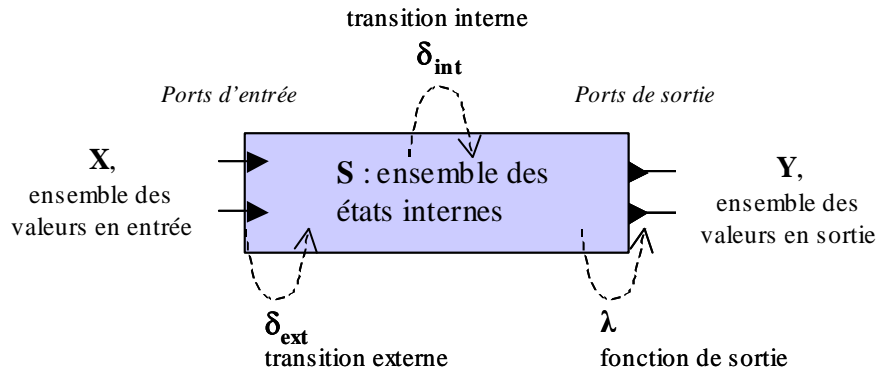


Figure 5-9 : Représentation graphique d'un modèle DEVS atomique

DEVS propose une décomposition de la fonction de transition de l'automate en deux fonctions δ_{ext} et δ_{int} . Ceci est l'un des points forts de DEVS car il permet de différencier les modifications liées à des événements externes, de celles liées aux évolutions autonomes du système. $\delta_{ext} (S \times X \rightarrow S)$ représente la réponse du système aux événements survenant en entrée. Alors que, sans l'intervention d'événement externe, $\delta_{int} (\delta_{int} : S \rightarrow S)$ est la seule fonction qui fasse évoluer le système de façon *autonome* en ne prenant en compte que l'état S et le temps. Dans ce cas, lors d'un changement d'état interne s , la fonction $ta(s)$ est évaluée. Elle définit alors par anticipation la date à laquelle s passera dans le prochain état s' . Elle active également la fonction de sortie $\lambda (S \rightarrow Y)$ qui permet d'exhiber l'ensemble des états S du système sur la sortie Y et d'émettre à son tour de nouveaux événements vers l'extérieur.

Le chapitre 3 de la thèse de [Duboz, 2004] explique clairement les spécifications de Zeigler. Le graphe suivant, qu'il propose, illustre le déroulement d'un scénario. En voici les explications :

A l'état initial, le système est dans l'état s_0 à T_0 . La fonction ta nous indique que pour l'état s_0 , le système changera d'état à $T_0 + ta(s_0)$ si aucun événement externe ne survient. A $T_1 = T_0 + ta(s_0)$, aucune entrée n'a eu lieu. La fonction de sortie $\lambda(s_0)$ est donc activée et Y_i prend pour valeur la valeur produite par l'évaluation de cette fonction. Après avoir affecté les ports de sortie, la fonction de transition interne δ_{int} est appliquée. Le système passe dans l'état $s_1 = \delta_{int}(s_0)$ et changera d'état à $T_1 + ta(s_1)$. A l'instant $T_2 < T_1 + ta(s_1)$, un événement externe arrive en entrée sur le port X_i . Il est alors fait appel à la fonction de transition externe pour déterminer le nouvel état. Dans ce cas, la fonction de sortie n'est pas appliquée : elle n'est appliquée que lors d'une transition interne. A l'instant T_2 , le système passe dans l'état $s_3 = \delta_{ext}((s_1; e); v)$ avec $e = T_2 - T_1$ et v la valeur de l'événement attaché au port X_i . Ici, c'est bien la fonction de transition externe qui détermine le changement d'état. On suppose que s_3 est transitoire ($ta(s_3) = 0$). Il y a évaluation immédiate de la fonction de sortie $\lambda(s_3)$ qui donne une valeur au port de sortie Y_n . Cette évaluation est instantanément suivie par celle de $s_4 = \delta_{int}(s_3)$. Le nouvel état s_4 est passif ($ta(s_4) = \infty$). [Duboz, 2004]

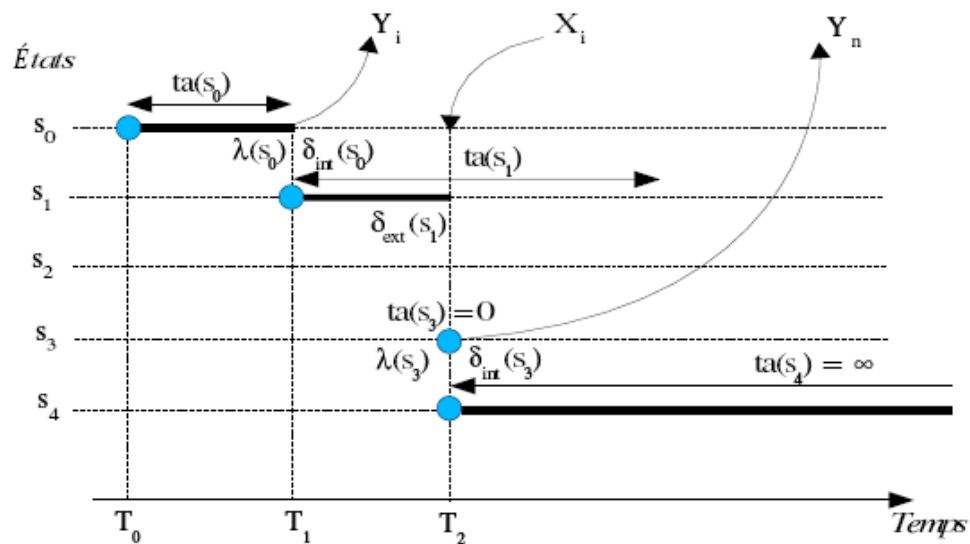


Figure 5-10 : Exemple de graphe de transitions d'un modèle DEVS atomique d'après [Duboz, 2004]. Les lignes pointillées verticales représentent les dates d'occurrences d'événements. Les cercles pleins représentent l'état courant du système et les lignes horizontales l'avancement du temps. Une transition est marquée par le passage d'un niveau à un autre sur la verticale.

- Niveau DEVS couplé

Ce niveau permet de définir un modèle agrégé formé de modèles atomiques et de modèles couplés par réflexivité. Un réseau d'automates par exemple est défini comme un système composé de sous-systèmes couplés : les entrées des uns étant les sorties des autres. C'est une construction hiérarchique que Zeigler représente de la façon récursive suivante :

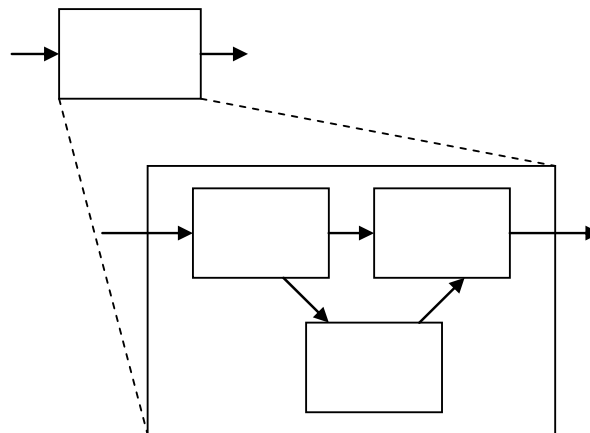


Figure 5-11 : Décomposition d'un système hiérarchique, selon Zeigler.

Zeigler démontre dans ce qu'il appelle la propriété de "fermeture sous couplage" qu'un modèle couplé est rigoureusement équivalent à un modèle DEVS atomique en termes de comportement dynamique.

- Exemple : modèle proie-prédateur de R. Duboz

En travaillant sur la modélisation des copépodes, R. Duboz est un des premiers à avoir intégré la formalisation DEVS dans un modèle multi-agent. Son travail a permis une implémentation non ambiguë d'un simulateur de dynamique de populations de phytoplancton et de copépodes en interaction. Il montre entre autres, que les caractéristiques individuelles influencent la dynamique globale. Pour cela, il propose un couplage de modèles pour la spécification d'un système où cohabitent plusieurs niveaux d'organisations. Cet exemple nous sert à illustrer une gestion événementielle dans un SMA.

En s'appuyant sur DEVS, son multi-modèle intègre un système d'équations différentielles couplé à un SMA. Au niveau global, la dynamique de la population est décrite par un modèle à équations de type Lotka-Volterra (modèle à dynamique lente). Mais à l'intérieur même du système d'équations, ce modèle intègre un SMA qui redéfinit les interactions proies-prédateurs (modèle à dynamique rapide). Le modèle lent NP , décrivant la dynamique des proies N (phytoplancton) et des prédateurs P (Copépodes), est donné par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = r.N.(1 - \frac{N}{K}) - G_{(N,P)}.P \\ \frac{dP}{dt} = G_{(N,P)}.P - m.P \end{cases}$$

La dynamique des proies N par exemple se compose d'une partie classique (fonction logistique) et d'une autre partie $G_{(N,P)}.P$ qui correspond à la pression de prédation. Mais l'originalité de ce travail repose sur le fait que la fonction $G_{(N,P)}$ n'est pas connue. Sa valeur g est calculée de façon externe par un SMA. Ainsi, à tout moment, la résolution numérique du système d'équations différentielles peut être perturbée par l'occurrence d'un événement retournant la valeur g . Inversement, à chaque pas d'intégration, le modèle lent interroge le SMA qui simule alors les interactions proies-prédateurs et qui retourne la valeur de ce paramètre d'interaction.

Les figures suivantes illustrent la structure de ce modèle :

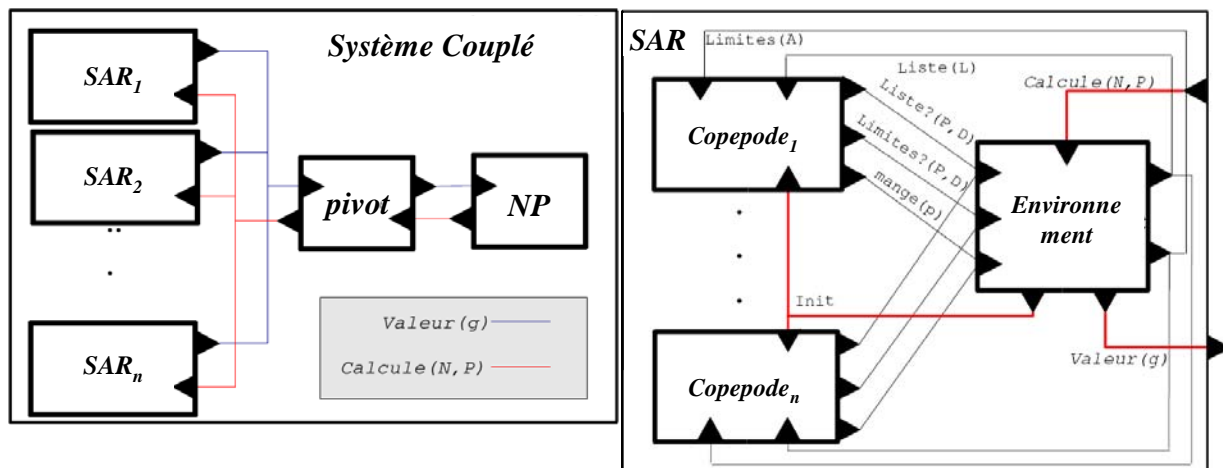


Figure 5-12 : Partie gauche : Structure du modèle couplé. Le modèle pivot joue le rôle d'intégrateur des résultats de simulations des SMA (système d'agent réactif noté SAR). 30 modèles SARs sont simulés pour le calcul d'une valeur moyenne de g .

Partie droite : Modèle SAR présentant la structure des connexions internes du SMA. Les noms sur les connexions correspondent au nom des événements. (D'après [Duboz, 2004])

Le modèle d'agent copépode est lui-même composé de quatre sous-modèles atomiques définissant les comportements élémentaires de l'agent. Ce modèle d'agent est plongé dans un environnement à qui il demande des informations sous forme d'émission d'événements externes à l'environnement ("Liste?", "Limites?", "Mange"). L'environnement répond en émettant en retour des événements externes au copépode, contenant par exemple la liste des proies localisées dans le rayon de perception de l'agent. La figure suivante montre la structure d'un agent copépode représenté par un modèle DEVS couplé.

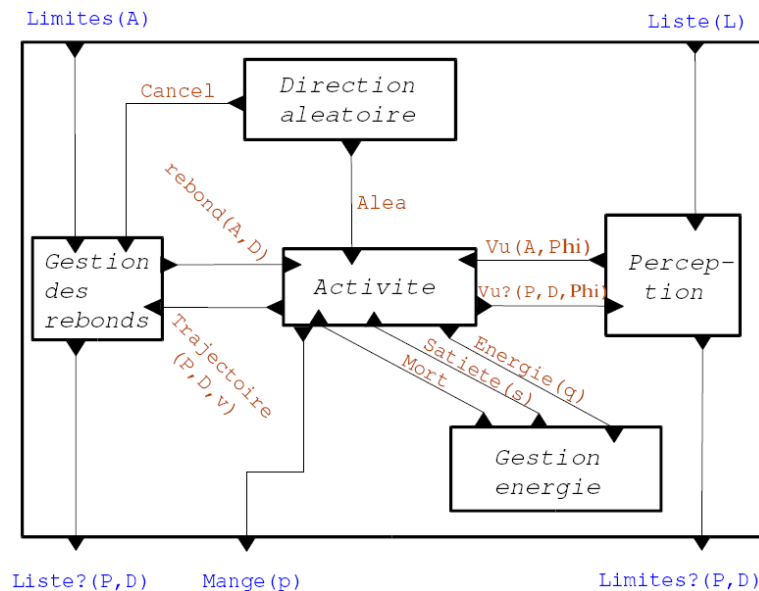


Figure 5-13 : Représentation graphique du modèle couplé de l'agent copépode. En bleu, figurent les événements externes attachés aux ports d'entrée ou de sortie du modèle couplé. Les événements véhiculés par les connexions internes figurent en rouge. (D'après [Duboz, 2004])

A ce niveau, le modèle d'agent intègre également un couplage multi-modèle. En effet, le modèle atomique "Gestion énergie" qui informe l'agent du niveau de satiété, contient une équation différentielle représentant la dynamique du bilan énergétique de l'animal. Ce modèle atomique écoute les événements externes notés "Energie(q)" déclenchés lors d'une capture de proie. En retour, il est capable de générer des événements de type "faim" (satiété(false)) et "mort" (plus d'énergie). A chaque réception de l'événement "Energie(q)", une nouvelle valeur initiale de l'énergie est calculée. La solution analytique de l'équation différentielle permet alors de calculer les prochaines dates des événements "faim" et "mort".

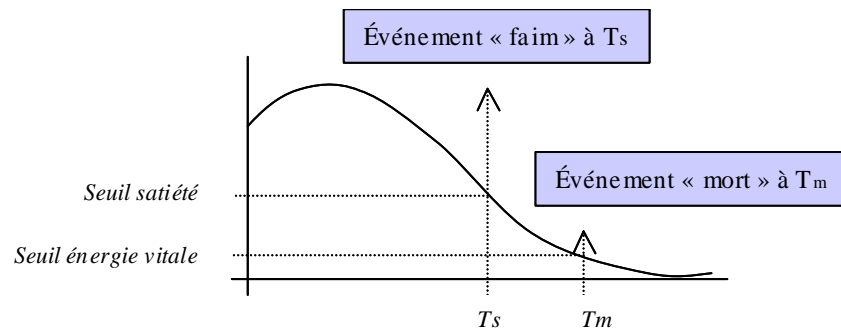


Figure 5-14 : Calcul et déclenchement des événements par modèle atomique "Gestion énergie" qui intègre une équation différentielle représentant le bilan énergétique du copépode

Bien qu'il existe des simulateurs abstraits pour les modèles DEVS, on peut noter que le simulateur de dynamique des populations implémenté par R. Duboz n'utilise pas d'objet *Événement* (par exemple la classe *Event* de Java) pour activer les dynamiques, mais par soucis d'efficacité, les interactions ont été émulées par de simples appels de méthodes.

5.3.2 Les modèles à pas de temps : simulation dirigée par l'horloge

Pour représenter l'évolution du temps, les simulations par horloge "discrétisent" le temps en "pas de temps" réguliers comme dans le cas des systèmes dynamiques discrets. Pour ce type de modèles, Δt est constant (on considère généralement que c'est une valeur entière égale à 1, par exemple $\Delta t = 1$ seconde, 1 jour, 1 an...). Les changements d'état ayant lieu durant l'intervalle $[t, t+\Delta t]$, une variable du système peut changer d'état toutes les Δt périodes. Entre les deux, elle est

censée rester constante. Par ailleurs, les entités sont supposées évoluer toutes en même temps et simultanément.

Les simulations par "pas de temps" peuvent être considérées comme un sous-type de simulation événementielle où les tops d'horloge constitueraient les événements. Mais, leurs mises en œuvre sont très différentes et bien plus aisées à réaliser. Elles proposent deux procédures d'activation des entités qu'on nomme approche synchrone et approche asynchrone⁵⁰.

5.3.2.1 Approche synchrone

On considère ici que d'un point de vue du temps *réel*, les agents évoluent tous simultanément. Du point de vue du temps *virtuel*, ils évoluent en parallèle. Les automates cellulaires (créés par Von Neumann et Ulam) constituent un bon exemple de déroulement synchrone. En effet, les cellules d'un réseau d'automates changent d'état toutes simultanément. Pour émuler une évolution synchrone d'un réseau d'automates, on passe fréquemment par un artifice informatique appelé double buffering [Travers, 1996] qui consiste en une mise à jour en deux passes de l'état des cellules. En effet, les automates cellulaires étant généralement exécutés sur des machines monoprocesseurs, l'algorithme doit simuler le traitement parallèle par l'intermédiaire d'une variable tampon (buffer). Lors du nouveau "pas de temps", l'ordonnanceur (aussi appelé scheduler) active séquentiellement toutes les cellules de l'automate qui exécutent alors leur fonction de transition. Chaque cellule change d'état en fonction de son état interne et en fonction de l'état de ses voisines. Mais bien sûr, il ne faut pas que le nouvel état soit immédiatement pris en compte dans le calcul de la fonction de transition d'une *autre* cellule. La fonction de transition doit s'opérer sur des états calculés et mémorisés au "pas de temps" précédent. Deux stratégies sont proposées. Pour chacune, un "pas de temps" est décomposé en deux phases:

- La plus répandue des stratégies consiste à stocker le résultat du calcul dans une variable tampon de la cellule. Lorsque toutes les cellules ont terminé cette première phase de calcul, l'ordonnanceur balaie à nouveau toutes les cellules du réseau pour demander à chacune de mettre à jour son nouvel état qui prend alors la valeur de l'état tampon.
- Une autre solution consiste à faire une copie du réseau (snapshot) en début de chaque "pas de temps" puis de faire calculer à chaque cellule sa fonction de transition en utilisant les valeurs des cellules clonées.

Ainsi, quelle que soit la stratégie d'exécution choisie, l'ordre séquentiel d'activation de chaque cellule n'a pas d'influence sur les résultats de simulation. Ici, chaque entité (cellule) ne modifie que son propre état. Mais dans le cas d'un SMA, il est souvent possible que des entités veuillent modifier l'état d'une autre entité (l'environnement, un autre agent, etc.). Nous verrons plus loin que ce cas de figure nécessite souvent des résolutions de conflits dans le cas de modifications concurrentes ou conflictuelles.

Selon la classification de Zeigler, ces modèles appartiennent à la famille des modèles DTSS (*Discrete Time System Specification*). De façon plus formelle, la spécification d'une DTSS est:

$$DTSS = \langle X; Y; S; \delta; \lambda; c \rangle$$

où :

X est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports d'entrée,

Y est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports de sortie,

S est l'ensemble des états du système,

δ est la fonction de transition (interne et/ou externe), $\delta: S \times X \rightarrow S$

⁵⁰ Dans la littérature, l'approche asynchrone fait souvent référence à l'approche à événements discrets. Nous préférons garder ce terme pour les simulations par horloge qui, contrairement aux automates cellulaires, activent les entités de façon séquentielle.

λ est la fonction de sortie (Moore, Mealy ou sans mémoire)

c est une constante employée pour spécifier la base temporelle (Δt).

Pour spécifier la fonction de transition d'un automate cellulaire, Zeigler définit deux fonctions:

- δ , la *fonction de transition* qui permet de calculer le nouvel état interne S' d'une entité en fonction de son état courant (S) et d'un ensemble d'inputs (X). Dans le cas des automates cellulaires, c'est une fonction de transition externe dont l'ensemble X correspond à l'état des voisins (visibles sur leurs ports de sortie).
- λ , la *fonction de sortie* qui peut être calculée selon trois procédés :
 - le type Moore, sans entrée : l'output d'une entité n'est calculé qu'en fonction de son état interne S . $\lambda: S \rightarrow Y$
 - le type Mealy : l'output d'une entité est calculé en fonction de son état interne S et d'un ensemble d'inputs X . $\lambda: S \times X \rightarrow Y$
 - le type sans mémoire FNSS (que l'on peut considérer comme un cas particulier du type de Mealy) : l'output d'une entité n'est calculé qu'en fonction d'un ensemble d'inputs X . $\lambda: X \rightarrow Y$

Classiquement, les automates cellulaires utilisent une fonction de sortie λ de type Moore pour laquelle l'output est égal à l'état interne (calculé par la fonction de transition δ):

$$\lambda: S \rightarrow Y \text{ avec } Y=S.$$

En d'autres termes, pour cette deuxième fonction, l'état "visible" d'une cellule devient l'état interne stocké en mémoire tampon. La majorité des simulations multi-agents utilisent les fonctions de type Moore et de type Mealy et nous reviendrons sur l'importance de discerner ces fonctions. Dans le cas d'un réseau d'automates, ce système est appelé multiDTSS (a multi-component DTSS model). Un simulateur DTSS se décrit alors de la façon suivante :

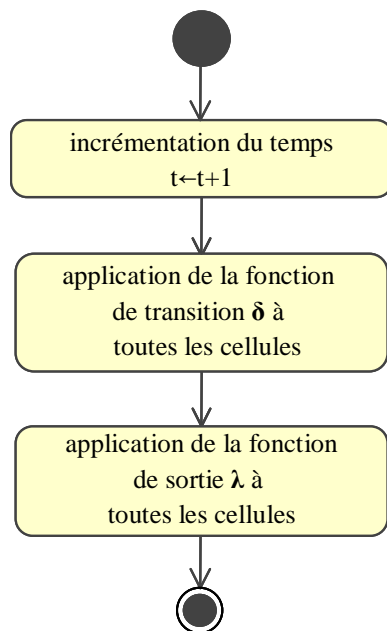


Figure 5-15 : Diagramme d'activité d'un pas de temps d'un simulateur DTSS. Le cas d'un ordonnanceur synchrone implique deux phases : une phase de calcul de la fonction de transition et une de mise à jour des variables de sortie.

Cette figure présente un diagramme d'activité d'un pas de temps de l'ordonnanceur synchrone. On peut également utiliser un diagramme de séquence pour expliquer le déroulement d'un pas de temps. Il a l'avantage de présenter différentes entités du système et des échanges de messages.

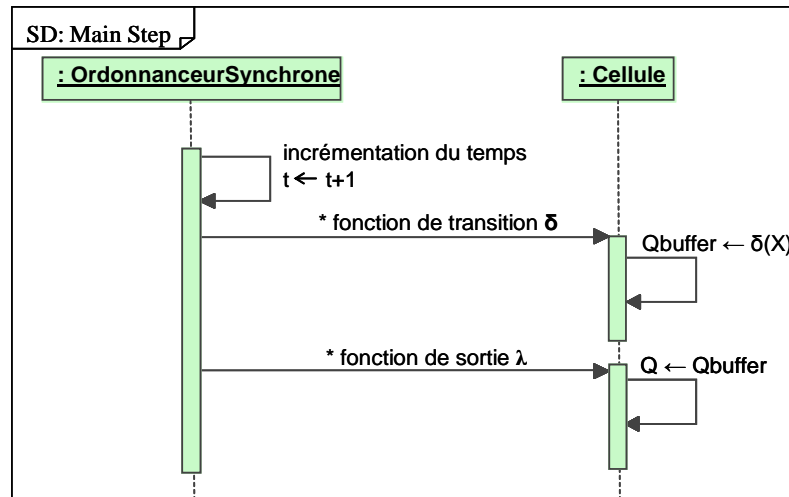


Figure 5-16 : Diagramme de séquence d'un pas de temps d'un ordonnanceur synchrone d'automate cellulaire.

5.3.2.2 Approche asynchrone

Dans l'approche asynchrone, d'un point de vue du temps *réel*, les agents sont censés évoluer simultanément. A chaque "pas de temps", tous les agents doivent avoir été activés une fois et une seule (on parle dans ce cas d'activation n-asynchrone). Dans leur grande majorité, les SMA utilisent ce principe pour activer les entités des modèles car la mise en œuvre de l'approche asynchrone est simple et aisée comme le montre la figure suivante :

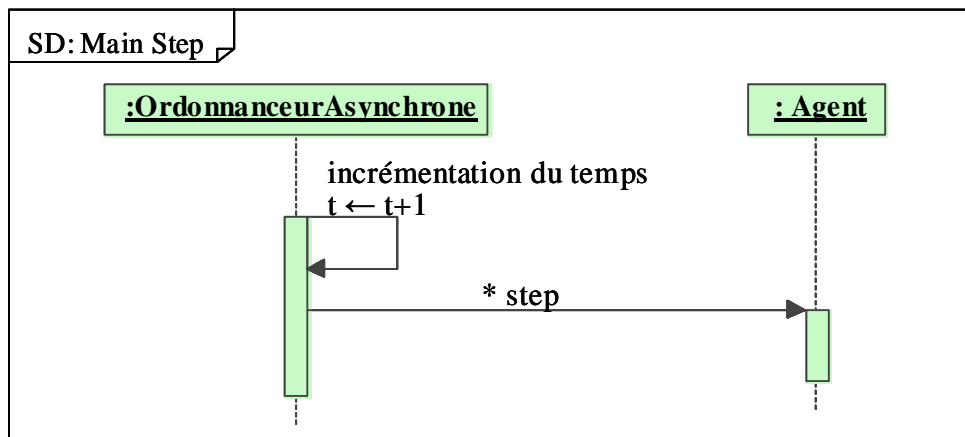


Figure 5-17 : Diagramme de séquence d'un pas de temps d'un ordonnanceur asynchrone. L'astérisque placé devant le "step" signifie en UML que l'appel de méthode est effectué sur toutes les instances d'Agent. Cette représentation ne montre pas quelles sont ces instances, ni dans quel ordre elles sont activées. De mon point de vue, ceci constitue une faiblesse.

A chaque itération, tous les individus sont activés un par un, de façon séquentielle. Aussi, contrairement à l'approche synchrone, on ne peut pas considérer que les agents évoluent effectivement en parallèle. En observant une simulation de ce type, on peut peut-être le croire. Mais ceci est dû à la rapidité d'exécution de leurs activités. Dans le détail, il n'en est rien : les agents agissent séquentiellement. De plus, chacun met à jour son état visible directement pendant son activation. Ainsi, à un instant donné pris au cours d'un "pas de temps", certains agents ont déjà changé d'état quand d'autres n'ont pas encore été activés. Souvent, en s'inspirant des systèmes dynamiques discrets (cf. équation (2)), les simulations par "pas de temps" sont formalisées de la façon suivante : une fonction F permet de calculer l'état du système au temps $t + 1$ à partir de son état à l'instant t . Si on note Σ_t l'état du système au temps t , on trouve :

$$\Sigma_{t+1} = F(\Sigma_t)$$

Or cette formalisation s'avère être fausse dans le cas d'une gestion asynchrone ! Pour passer de t à $t+1$, le système a subi une suite de modifications dues à l'activation séquentielle des agents et à la mise à jour en une seule passe de leur nouvel état.

En reprenant le formalisme DTSS décrit page 115, on considère dans ce cas de gestion asynchrone que la *fonction de sortie* λ utilisée au niveau du sous-modèle d'agent est de type Mealy :

$$\lambda: S \times X \rightarrow Y$$

Pour rappel, X est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports d'entrée, Y est l'ensemble des valeurs possibles sur les ports de sortie, S est l'ensemble des états du système et λ est la fonction de sortie. Ici, l'output d'un agent est calculé immédiatement en fonction de son état interne S et d'un ensemble d'inputs X . La fonction de sortie qui permet de calculer le nouvel état visible de l'agent, utilise directement des données sur ses ports en entrée, c'est-à-dire qu'elle utilise des informations internes (S) et externes (X) à l'agent pour calculer immédiatement son nouvel état. Ce changement d'état est immédiatement perçu par les autres entités du système. Ainsi le principal problème de l'approche par horloge relève de la cohérence des différentes perceptions que les agents ont du monde :

Le monde perçu par différents agents à un même instant t de la simulation n'est pas identique. En effet, un agent perçoit à t un monde qui a été modifié par les agents qui ont agi avant lui. En d'autres termes, la perception d'un agent peut potentiellement s'appuyer sur des variables qui devraient être estampillées à $t + dt$. Et ce, alors que les agents sont supposés agir de manière concurrente à cet instant. Ainsi le dernier agent peut avoir une vue du monde totalement différente du premier alors que l'état de celui-ci est censé toujours être donné pour l'instant t . L'action d'un agent, qui est en principe déduite de sa perception du monde, est en fait directement liée à sa position dans la liste d'activation et par conséquent aux actions effectuées auparavant par les autres agents. [Michel 2004]

Il faut donc garder à l'esprit que ce type de gestion du temps peut dans certains cas avoir des effets non négligeables sur les résultats de simulation. Comme nous le verrons ultérieurement sur des exemples concrets, les impacts sur le comportement d'un modèle peuvent être importants. En effet, dans le cas d'utilisation de ressources par exemple, le premier agent activé prend rapidement l'avantage sur les autres agents : il se sert toujours le premier ! Pour essayer de remédier à ce problème, la technique la plus employée consiste à mélanger aléatoirement l'ordre d'exécution des agents à chaque "pas de temps". Statistiquement, on rétablit ainsi un partage en évitant de donner l'avantage systématiquement aux mêmes agents. C'est par exemple la méthode utilisée dans [Epstein & Axtell, 1996].

5.3.3 Biais liés à la séquentialisation du temps

Dans la lignée de Sugarscape, de très nombreux modèles utilisent une gestion par "pas de temps" avec brassage aléatoire. Si dans certains cas, cette stratégie influence peu les résultats des simulations, dans d'autres, les conséquences peuvent être considérables.

5.3.3.1 Expliquer les impacts sur les résultats d'une gestion synchrone et asynchrone

Pour faire prendre conscience de ce problème de synchronie – asynchronie à des apprentis-modélisateurs, nous utilisons un petit jeu de rôle lors des formations. La règle du jeu est la suivante: l'état de chaque joueur peut prendre quatre valeurs : les 2 mains à plats, les 2 mains en l'air, main droite en l'air – main gauche à plat, et réciproquement, main droite à plat – main gauche en l'air. La fonction de transition est : la main droite doit copier la position de la main gauche du voisin de droite et la main gauche doit copier la main droite du voisin de gauche. A T_0 , chaque joueur décide d'un état aléatoire qu'il doit mémoriser. Le formateur joue alors le rôle de l'ordonnanceur.

1^{er} déroulement du jeu : Procédure asynchrone. Le formateur demande à un joueur au hasard d'appliquer la règle de transition. Puis en passant successivement tous les joueurs, il demande à chacun d'exécuter cette règle en prenant en compte l'état actuel de ses voisins.



Figure 5-18 : Déroulement d'un jeu de rôle "automate cellulaire humain", lors d'une session de formation à l'Université de Pretoria - Afrique du Sud.

En rejouant cette session mais en commençant par un autre joueur, chacun constate que sa position finale est différente de la première session. L'état final dépend du choix aléatoire que le formateur a pris pour désigner le premier joueur. En quoi ce choix intervient-il dans la règle du jeu ?

2^{ème} déroulement : Procédure synchrone. Le formateur demande à chaque joueur de calculer intérieurement sa prochaine position en fonction de l'état actuel de ses voisins, sans changer la position de ses mains. Puis lors d'un deuxième passage, il demande à chacun d'appliquer la position mémorisée précédemment. En répétant ce jeu, on retrouve le même état final et ceci quel que soit l'ordre des joueurs choisi par le formateur.

5.3.3.2 Automate cellulaire synchrone et asynchrone

Pour mieux se rendre compte de ce phénomène, regardons les conséquences de ces différentes gestions du temps sur un automate cellulaire simple simulant un feu de forêt. Ici, la fonction de transition est rudimentaire et déterministe : si une cellule est dans l'état "forêt" et qu'au moins une de ses voisines est en "feu", alors elle deviendra en "feu" à son tour. Si elle est vide, son état ne peut changer. Si elle est en feu, elle s'éteint d'elle-même. Le diagramme d'état-transition ci-dessous représente cette fonction de transition en présentant tous les états possibles d'une cellule et les événements qui provoquent les changements d'état :

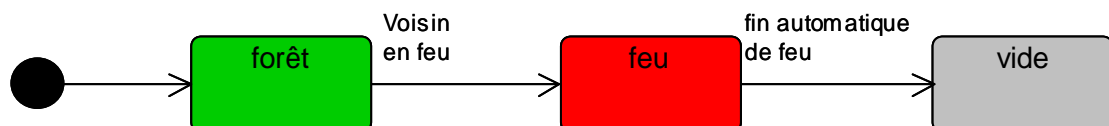


Figure 5-19 : Diagramme d'état-transition d'une cellule.

A partir d'une même configuration spatiale initiale, nous simulons la propagation du feu pour étudier trois gestions différentes du temps. En appliquant la même fonction de transition, les trois images suivantes montrent les résultats sur une grille spatiale d'un "pas de temps" de simulation géré de trois manières différentes : (a) par approche synchrone, (b) par approche asynchrone sans brassage (l'ordre d'activation correspond à l'ordre de la répartition des cellules, c'est-à-dire d'en haut à gauche jusqu'en bas à droite) et (c) par approche asynchrone avec mélange aléatoire de l'activation.



Figure 5-20 : Résultats après un pas de temps de trois gestions différentes du temps: (a) approche synchrone, (b) approche asynchrone non mélangée et (c) approche asynchrone avec mélange aléatoire de l'activation. Les trois simulations ont été effectuées à partir d'un même état initial : une grille de 30x30 en voisinage 8 (Moore), couverte de forêt avec un foyer de départ du feu toujours localisé au même endroit.

Dans le cas (a) d'un déroulement synchrone, on reconnaît une diffusion concentrique du feu qui s'étend progressivement sur la forêt. C'est le résultat escompté d'une diffusion simple.

Dans la gestion asynchrone non mélangée (b), le feu envahit quasiment tout l'espace en un seul "pas de temps". L'activation ordonnée (par ligne, du haut vers le bas) et la mise à jour de l'état des cellules en une seule passe est la cause unique de ce phénomène. En effet, au cours de ce "pas de temps" et au moment de son activation, chaque cellule située au sud du foyer sera voisine d'une cellule en feu. Elle prendra alors feu à son tour. Son nouvel état est perçu par ses voisins du sud qui prendront également feu au moment de leur activation. L'application immédiate de la fonction de transition couplée à l'ordonnancement de l'activation des cellules de bas en haut explique donc cette diffusion instantanée du feu sur toute la partie sud de la grille.

L'approche asynchrone avec mélange aléatoire de l'activation (c) produit un résultat intermédiaire. De façon statistique, le feu se diffuse beaucoup plus rapidement que dans le cas (a) mais n'envahit pas tout l'espace d'un seul coup. Dans certains cas, il peut même s'éteindre tout de suite : la cellule-foyer est activée avant ses voisines. Pour cette troisième gestion, si statistiquement on obtient une diffusion très rapide, tous les cas de figures sont néanmoins possibles, de l'extinction immédiate à un embrasement total. Le problème ici c'est que le résultat d'une simulation dépend en grande partie d'un facteur aléatoire. Le plus grave est que ce facteur n'est pas rattaché à l'essence même du modèle : la diffusion simple, telle qu'elle est décrite, est déterministe. Ici ce facteur aléatoire touche à la machinerie de la simulation, mais son impact sur les résultats du modèle est considérable.

Evidemment, l'exemple présenté ici est caricatural mais révèle bien l'importance du phénomène⁵¹. Les exemples suivants montrent des modèles plus réalistes, voire très sophistiqués. Cependant leurs concepteurs n'ont pas toujours perçu l'importance que ce type de gestion du temps pouvait entraîner.

5.3.3.3 Modèle de la pêche artisanale au Sénégal : Mopa

Conçu sur plusieurs années par J. Le Fur [Le Fur, 1990, 1994, 1995, 1996 et 1997], le modèle Mopa a pour objectif d'étudier la pêche artisanale maritime au Sénégal. Il cherche à représenter en un modèle réduit virtuel, l'ensemble de l'exploitation des ressources halieutiques en examinant les mécanismes et les dynamiques de la filière pêche. Plus spécifiquement, ce projet vise à décrire et modéliser la réponse de la pêcherie aux changements de son environnement (naturel, économique, social). Ce travail a également alimenté une réflexion sur la viabilité des systèmes écologiques et économiques [Le Fur et al., 1999].

⁵¹ On trouve des conclusions équivalentes dans [Huberman, & Glance, 1993]

Le modèle englobe la composante productive (pêche) et la commercialisation (mareyage). Il est fondé à la fois sur une approche systémique de la filière et la représentation au niveau local (communautés) des acteurs intervenant dans sa dynamique [Le Fur, 2000]. En effet, il est conçu sous la forme d'un ensemble de réseaux interconnectés dans lesquels circulent différents types de flux (poissons, monnaies, acteurs humains, information), mais il est également fondé sur la représentation du comportement des communautés actives (pêcheurs et mareyeurs) en interaction avec la variabilité de la ressource naturelle et du contexte socio-économique dans lequel ils s'insèrent.

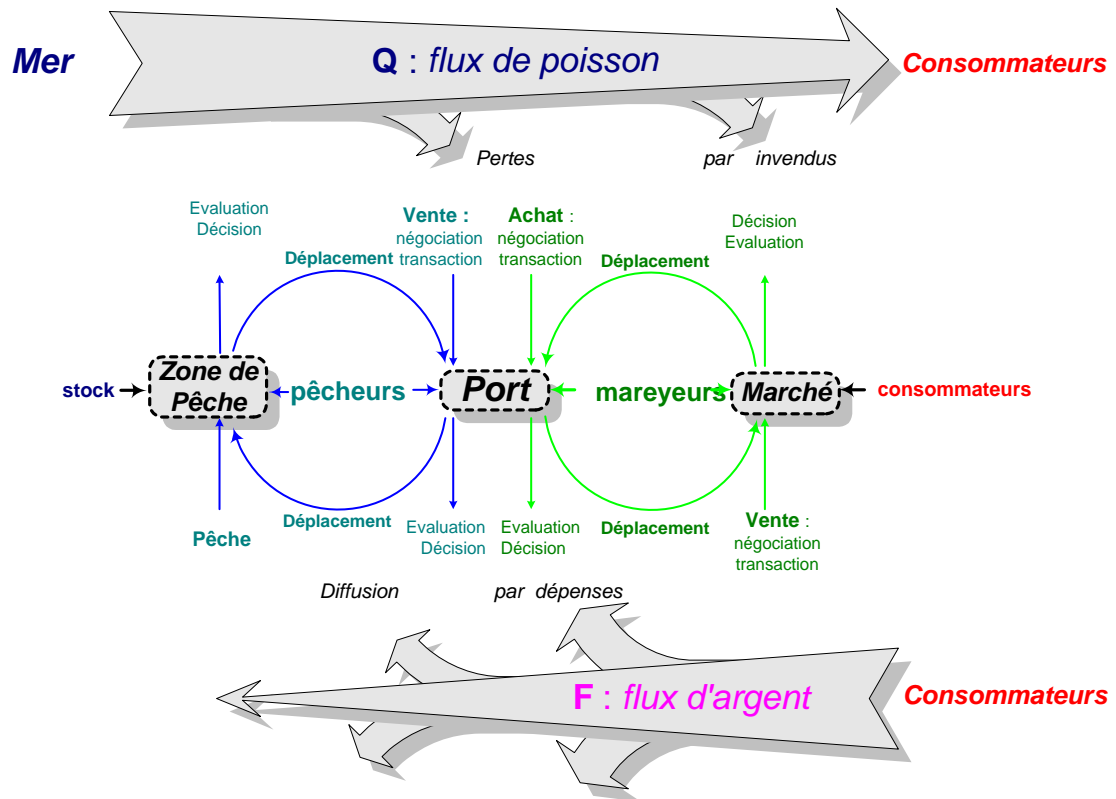


Figure 5-21 : Schéma d'organisation de la pêche et du mareyage dans Mopa, montrant les zones spatiales (en pointillée), les entités (stock, pêcheurs, mareyeurs, consommateurs) et les flux à travers la filière : flux de poisson, flux d'argent, déplacements des agents. D'après [Bommel, 1997b].

Pour rendre compte du fonctionnement de la filière, l'accent a été mis sur les processus de décision des agents :

"Les choix des communautés dépendent (i) de leur environnement, (ii) de l'information qu'elles peuvent en obtenir (iii) de leurs objectifs (ex: pêcher, vendre) et (iv) de leurs caractères, leurs habitudes, leurs degrés de confiance dans les alternatives disponibles. Les choix réalisés par les communautés vont alors conditionner les divers flux circulant entre les composants représentés: flux de poisson, d'argent, d'acteurs humains et d'information" [Le Fur, 1995].

La figure suivante montre un exemple de comportement d'un mareyeur pour choisir un port et y acheter du poisson.

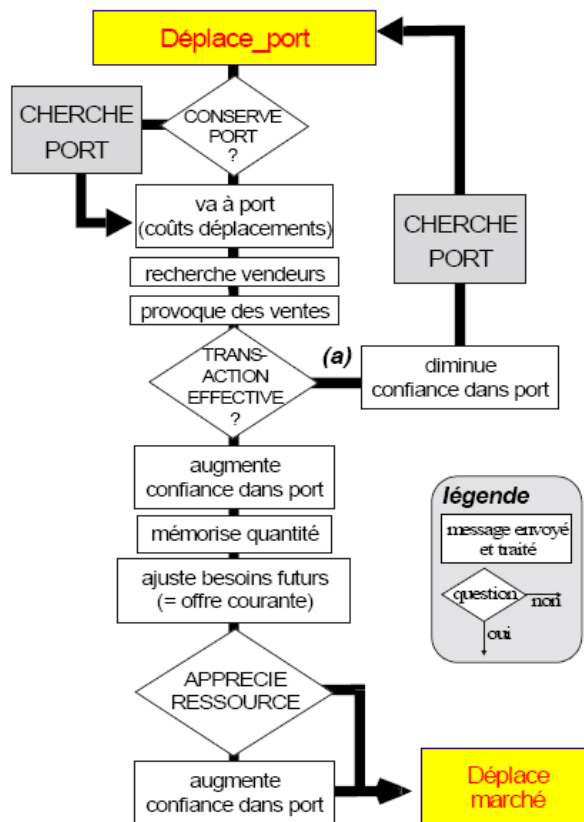


Figure 5-22 : Modèle d'action et de décision d'une phase de la simulation: un mareyeur vient s'approvisionner dans un port. D'après [Le Fur 2000].

Voici, dans les termes de l'auteur, l'explication de ce graphe:

Arrivé au port, l'agent recherche les pêcheurs qui disposent des espèces qu'il désire acquérir. Il provoque alors la vente de ces pêcheurs. Intervient ici un autre processus de négociation qui vise à représenter le marchandage entre l'acquéreur et le vendeur, comme cela se passe sur les centres de débarquements de la pêche artisanale au Sénégal. Ce modèle, non représenté ici, est décrit dans d'autres publications (Le Fur, 1996b, 1997). Il fait intervenir des décisions (accepter, proposer un prix) qui sont formalisées sous la forme du choix d'un mode dans une distribution de probabilité. [Le Fur 2000]

En mettant l'accent sur les processus de décision, de négociation et de marchandage, on comprend à la lecture de cet extrait que ce modèle est déjà bien complexe.

En 1997, j'ai été chargé de travailler sur la validation de ce modèle [Bommel, 1997a, 1997b]. Pour tester les facultés d'adaptation de la filière, j'ai, entre autre, mené une analyse de sensibilité sur Mopa. En observant principalement les quantités totales de poissons circulant dans la filière, la masse monétaire totale des agents, les prix des poissons et les quantités consommées, j'ai fait varier plusieurs paramètres tels que :

- Les paramètres périphériques, c'est-à-dire les sources des flux aux extrémités de la filière qui alimentent le système, qu'il s'agisse des ressources en poissons ou en argent : prises par unité d'effort par espèce, argent par consommateur, demande des consommateurs.
- Les paramètres internes : coût de transport et capacité des engins de transport (camions et pirogues).
- Sensibilité aux conditions initiales ciblées sur la distribution des agents : nombre d'agents par scénario, effectif par agent (communauté), rapport entre le nombre d'agents-pêcheurs et le nombre d'agents-mareyeurs.
- Et ce que j'avais appelé à l'époque, les variables informatiques qui relèvent de l'ordre d'activation des agents.

Nous reviendrons plus tard sur la nécessité de mener une analyse de sensibilité (chap. 8). Juste quelques mots ici pour dire que ce travail, indispensable, a permis de révéler et de corriger des points de non-fonctionnement du simulateur. Il permet aussi de mieux comprendre le

comportement du modèle, d'en anticiper les réactions et de mieux en expliquer les résultats. Ce travail procure à celui qui le mène une compréhension fine du fonctionnement du modèle, certainement meilleure que celle du concepteur lui-même.

Les résultats de l'analyse (voir [Bommel, 1997b]) ont montré entre autre une gradation de la sensibilité du modèle aux différents paramètres. Certains, très robustes, avaient peu d'influence sur ses comportements quand d'autres (demande des consommateurs, distribution initiale des agents) modifiaient plus profondément ses réponses. Mais la sensibilité du modèle à tous ces paramètres restait bien moindre que ses réactions aux "variables informatiques". En effet, des modifications de l'ordre d'activation des agents influençaient bien plus les résultats du modèle que des variations de la valeur de ses paramètres, fussent-ils les plus sensibles.

Dans le modèle original, les mareyeurs (M) exécutent d'abord leurs actions, puis vient le tour des pêcheurs (P). Cette procédure (appelée MP2) est répétée deux fois de suite dans un "pas de temps" afin qu'un cycle entier de 15 jours puisse être bouclé (ex : aller pêcher puis revenir au port. cf. figure 5-21). D'autres procédures ont été créées comme PM2 (l'inverse de la précédente), MP1 et PM1 (sans répétition, donc le pas de temps équivaut à 7,5 jours), MPPM et PMMP et enfin les procédures mélangées (mel1 et mel2) où chaque agent de la liste est alternativement un pêcheur et un mareyeur. Toutes les simulations montrent que les effets de l'agencement des agents influencent terriblement les réponses de la filière. Les résultats sur la masse monétaire de la filière (F) sont présentés sur la figure suivante.

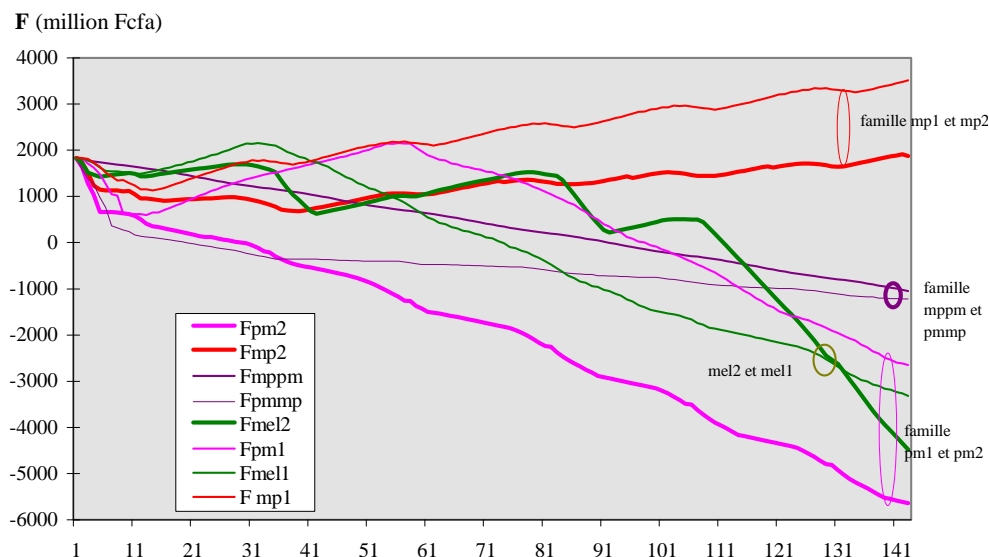


Figure 5-23 : Dynamiques de la masse monétaire F résultant de l'agencement des agents. Les réponses peuvent être regroupées en familles. La famille MP (1 et 2) est la seule, après une période d'adaptation, à avoir une augmentation de F avec le temps. Les autres sont déficitaires. Les courbes PM1 et PM2 apparaissent parallèles au bout d'un certain temps et on peut considérer qu'elles appartiennent alors à la même famille. Les réponses de F dans les cas MPPM et PMMP sont très rectilignes. Enfin, il n'est pas évident d'associer les courbes mel1 et mel2. D'après [Bommel, 1997b].

L'ordre d'action des agents présente donc des effets considérables sur la dynamique de la masse monétaire et par conséquent sur la viabilité de l'exploitation. Or ce constat pose problème car a priori rien ne permet de déterminer dans quel ordre les acteurs doivent agir. Lié à la machinerie du simulateur, cet ordonnancement semble être un paramètre externe au modèle mais il influence considérablement son comportement. Si ce facteur n'appartient pas au domaine, qu'est-ce que ce modèle peut nous dire sur la santé de la filière ?

Pour J. Le Fur, conscient de cette sensibilité, ce résultat apparaît comme un caractère intrinsèque des systèmes complexes : "Il apparaît que c'est le mode d'interaction qui détermine la dynamique dans le monde réel. Les SMA constitueraient ainsi un nouveau rapprochement au « monde réel ». On capte une dimension importante des modèles à l'interface natures et sociétés. [...] Il a été

démontré que le modèle était principalement dirigé par les interactions. Le fait que les interactions constituent également un déterminant majeur du monde réel justifiait alors l'utilisation de ces SMA." [Le Fur, 2005].

Certes, les interactions entre les acteurs semblent jouer un rôle important que MOPA essaie de capturer et dans ce cas il est intéressant que le modèle exhibe cette sensibilité. Néanmoins, il me semble que laisser un facteur aléatoire ou informatique décider de la réponse d'un modèle, annihile la portée de celui-ci. Car l'ordonnancement des activations n'est pas un choix fort lié à des observations sur le terrain. La question à l'origine de ce travail portait sur les réactions de la pêcheurie aux changements de son environnement. Or, si la réponse est dirigée par un facteur externe au domaine, le modèle ne fournit pas d'explication. Si la réponse d'un modèle résulte entièrement de ce facteur, le comportement du système observé reste encore obscur et sa modélisation n'a pas été suffisante pour en éclairer les mécanismes fondamentaux.

Mais cette critique ne signifie pas que le modèle est à abandonner. Cette évaluation négative doit au contraire nous forcer à comprendre les raisons de cette objection et rechercher les mécanismes en cause. Une des conclusions que je tirais de cette analyse en 1997, portait sur la nécessité de concentrer le travail de modélisation sur les interactions entre agents que je présentais sous la forme du graphique suivant :

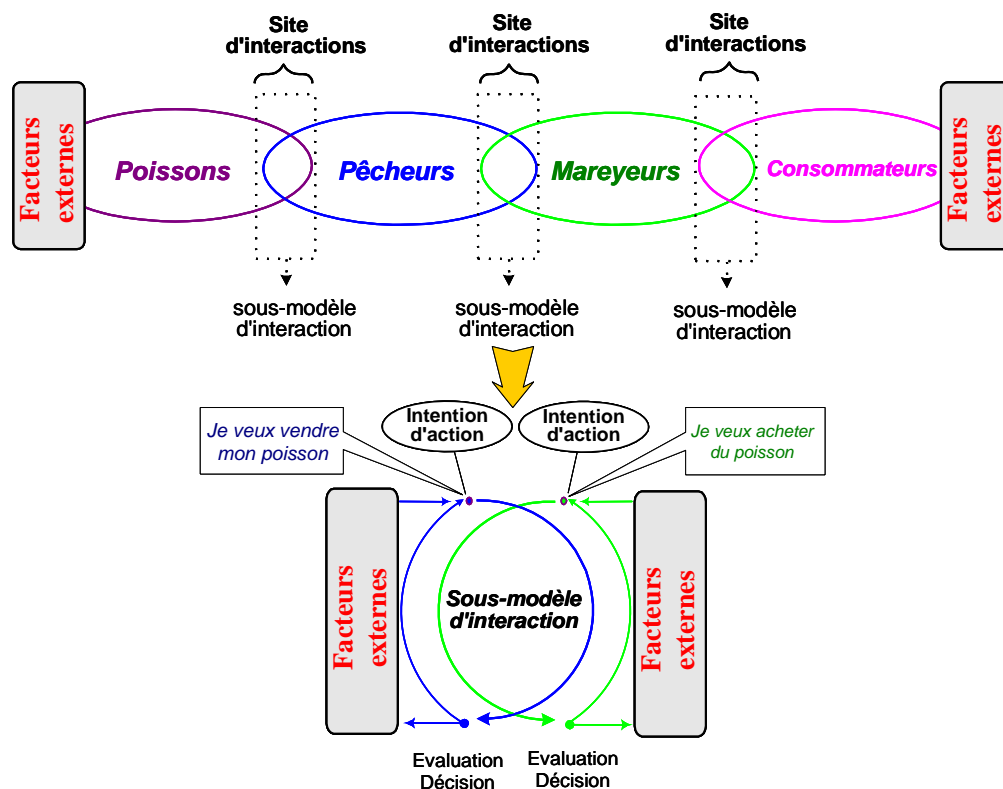


Figure 5-24 : Modélisation systémique et isolation de sous-modèles d'interaction. L'analyse des flux, des rétrocontrôles et des cycles des agents constitue le premier travail de modélisation. L'isolement de sous-modules qui caractérisent les points d'interaction, permet ensuite de se focaliser sur ces processus afin de les traiter correctement. D'après [Bommel 1997]

Pourtant, dans MOPA, les interactions entre les agents ont été soignées pour se rapprocher des observations faites sur les acteurs : choix des interlocuteurs, transactions, marchandage, évaluation de l'échange et mémorisation d'un facteur de satisfaction. Que pouvait-on faire de mieux ? Voici quelques pistes intéressantes pour mieux comprendre les impacts de l'ordonnancement des activations des agents.

- Mieux formuler l'échange entre les agents

S'il apparaît que les décisions des agents ont été soignées, les échanges en eux-mêmes (don de poisson contre don d'argent) dévoilent des lacunes.

Admettons qu'au temps t de la simulation un agent mareyeur M soit activé par l'ordonnanceur. Il possède alors le flot d'exécution. Dans la procédure originale MP2, celui-ci part vendre son poisson sur les marchés puis revient au port de son choix pour s'approvisionner à nouveau en poisson. En fonction de certains critères, il sélectionne des pêcheurs présents sur place à qui il essaiera d'acheter du poisson. Lorsqu'une rencontre entre deux agents M et P débouche effectivement sur une transaction, on constate alors que P n'actualise pas immédiatement le bilan de cet échange alors que M enchaîne sur un processus de mise à jour : M a prélevé du poisson à P et, en échange, l'a pourvu en une somme d'argent équivalente au résultat du marchandage. Comme le montre le diagramme de la figure 5-22, M fait alors le bilan de cette transaction : il apprécie son achat, modifie la confiance qu'il a dans le port, mémorise et met à jour son stock, ajuste ses besoins puis il se met en situation d'attente pour, au prochain "pas de temps", se déplacer sur les marchés et recommencer un cycle.

Mais cet échange n'a pas été provoqué par P . Lors de l'achat de poisson par M , P ne tire aucune conclusion de cette transaction : pas d'appréciation de l'acheteur, ni du port et pire que cela, pas de « conscience » que son stock est vide et il ne prend donc pas de nouvelle résolution sur la prochaine action qu'il mènera. La mise à jour des stocks par P sera effectuée seulement au cours du "pas de temps" suivant. Placé dans une position "vente de poisson", il s'apercevra trop tard qu'il n'a plus rien à vendre et qu'il doit aller pêcher.

Ce fonctionnement asymétrique de la transaction accentue les effets asynchrones des actions et amplifie les biais liés à l'ordonnancement des activités. Malgré des efforts de modélisation des processus de décision, nous voyons ici que la faiblesse de la formalisation de l'échange entraîne des effets non négligeables sur l'écoulement des flux au sein de la filière. Ce phénomène renforce l'idée que la modélisation de l'interaction entre les agents est un problème crucial. Au chap. 6, nous verrons que la faiblesse de la formalisation de l'échange est étroitement liée à l'autonomie des agents.

- Choix de la granularité temporelle

Pour respecter le schéma de déplacement des acteurs, le "pas de temps" de Mopa équivaut à 15 jours. Durant cette période, ils effectuent à tour de rôle un cycle complet, du port vers les zones de pêche puis retour au port, par exemple. Sur un "pas de temps", les activités de chaque agent sont nombreuses. Entre autres, ils peuvent engager plusieurs transactions avec d'autres agents. Les biais liés à l'échange, comme énoncés précédemment, sont donc d'autant plus amplifiés.

Il paraît donc important dans les modèles de type filière où les échanges entre les acteurs sont nombreux, de réduire le nombre d'actions élémentaires que peuvent faire les agents par "pas de temps". Ici par exemple, il aurait été préférable de raccourcir la durée à un demi-cycle, soit 7 jours et demi. Voire le réduire davantage si les biais persistaient. Une autre solution consiste à rajouter dans le "pas de temps", des points de synchronisation.

Si le biais présenté pour l'automate cellulaire feu était caricatural, l'exemple de Mopa l'est moins, mais les conséquences sur les résultats restent importantes. En choisissant un modèle plus réaliste, où l'accent est mis sur le comportement des agents, le modélisateur n'a pas envisagé toutes les conséquences que cette gestion du temps pouvait entraîner. Soulevons néanmoins que Mopa constituait un travail pionnier dans la mesure où les circonstances de l'époque ne proposaient ni plate-forme ni recul nécessaire. L'autre exemple suivant montre, les conséquences que peut entraîner une gestion asynchrone du temps.

5.3.3.4 Simulation du vieillissement de la population française et l'évolution de la dépendance à l'horizon 2040 : le modèle Destinie

Les biais liés à la gestion du temps asynchrone commencent à être relevés et discutés. Ainsi, Thomas Meurisse en donne un exemple dans sa thèse [Meurisse, 2004] : le modèle Destinie, conçu par l'INSEE. En pointant les anomalies du cahier des charges, il s'appuie sur cet exemple pour révéler la dichotomie entre l'expert du domaine et l'informaticien pour la conception de simulations.

Ayant été établi à partir d'une première version de base [Blanchet et Chanut, 1996], le modèle Destinie (modèle Démographique, Economique et Social de Trajectoire Individuelles simulEes) a été développé au sein de la division "Redistribution et Politiques Sociales" de l'INSEE. Il a été conçu dans l'optique d'éclairer les pouvoirs publics pour les réformes à venir. Il a pour principal objectif la projection à long terme des retraites et de la situation des retraités, afin de fournir une évaluation des différentes réformes des régimes de retraite [DGPTE, 2004]. Une attention particulière a été portée à la modélisation des événements démographiques (naissances, décès, unions, séparations) et aux carrières salariales (niveau de salaire, passages éventuels par le chômage ou l'inactivité). Il est ainsi sensé donner une image de la structure de la population française par âge, par sexe, par type de famille jusqu'à l'horizon 2040. Il simule également les carrières des individus, selon les différents statuts d'occupation et le niveau de salaire [INSEE 1999].

Le modèle a montré de nombreux atouts et il a également rencontré des critiques : hypothèses fortes quant à la croissance future des salaires réels, pas de prise en compte de la croissance des inégalités, ni marché du travail, ni des conséquences du vieillissement des populations sur la dynamique macroéconomique (consommation et épargne, croissance, etc.), ni encore du progrès technique et de la productivité [Cour des Comptes, 2000] [Bardaji et al., 2002].

Toutes ces critiques touchent à des éléments liés au domaine. Grossièrement, malgré sa grande complexité, on lui reproche de ne pas être assez réaliste. Mais le plus étrange est qu'on ne trouve aucune critique ni analyse de la gestion du temps. Comme le souligne T. Meurisse :

On retrouve donc ici un outil de simulation très complexe. Complexe au sens où la modélisation des individus a été très poussée et décrite à un niveau suffisamment fin pour prendre en compte quantité de variables [...]. Par contre, chose assez étonnante, la description opérationnelle (que l'on pourrait qualifier d'implémentation des descriptions liées aux données du modèle) semble triviale et très simple : un simple organigramme décrit le moteur de simulation qui procède séquentiellement sur l'évaluation des différents individus. Plus généralement, le déséquilibre entre une analyse liée au domaine (ici le recensement démographique et l'extrapolation sur des analyses numériques très poussées) et une implémentation que nous pourrions qualifier de légère, est très important.

En effet, le cœur du simulateur est décrit par un organigramme simple du type diagramme de séquence (voir figure suivante).

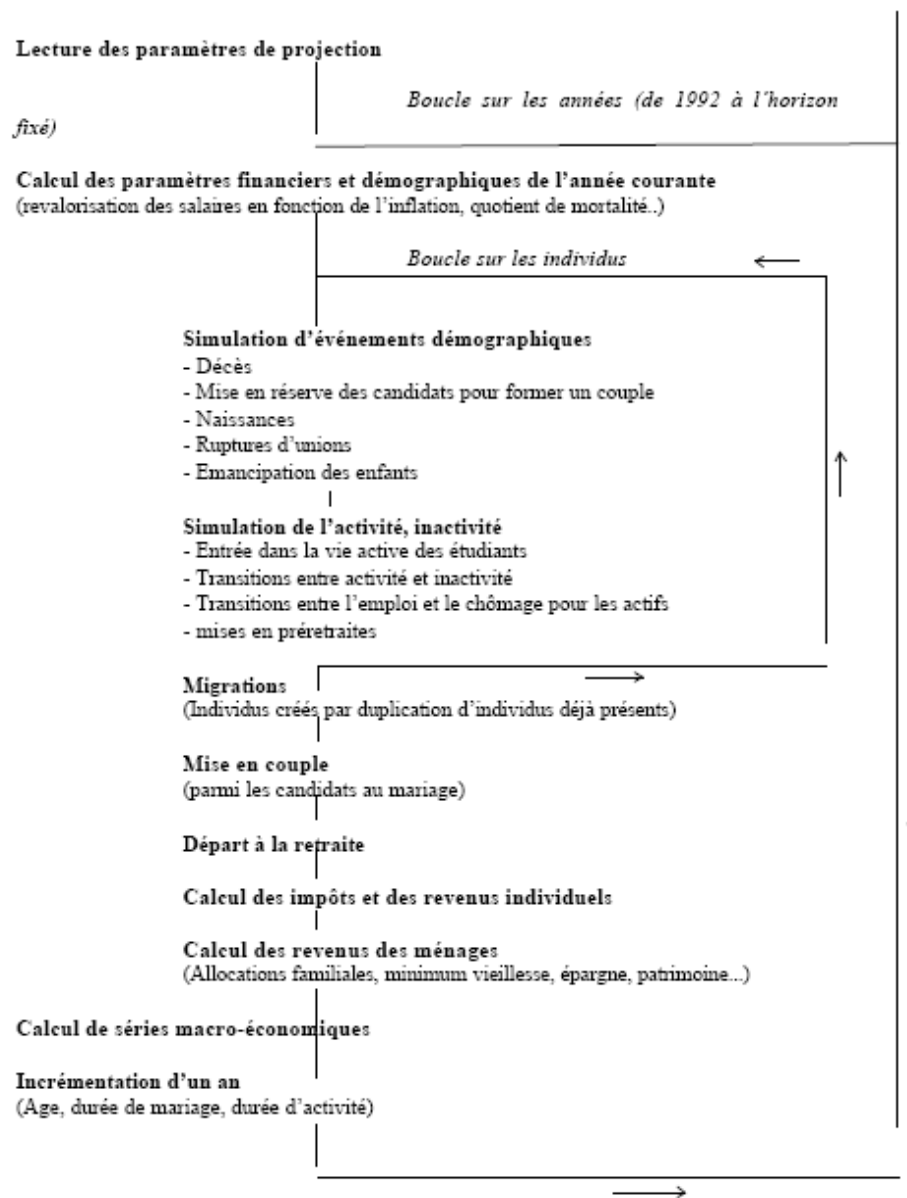


Figure 5-25 : Structure de Destinie : enchaînement des événements démographiques. D'après [INSEE, 1999]

Comme dans beaucoup de projets, la description de la procédure centrale de la simulation est peu précise. Les détails de cette procédure sont négligés. En particulier, elle ne lève pas toutes les ambiguïtés sur sa mise en œuvre. Et si cette procédure ne pose pas de difficulté en soi, nous avons vu que la gestion du temps est un point fondamental de la simulation. Sa mise en œuvre peut influencer fortement les résultats du modèle. Mais trop souvent, ni les thématiciens, ni les informaticiens n'en perçoivent l'importance. D'ailleurs, le passage à l'implémentation est considéré comme une simple technique, l'informaticien étant vu comme un simple technicien [Davidsson, 2002]. Ici, la traduction du modèle conceptuel en un simulateur apparaît comme naturelle, voire triviale. Aucune étape intermédiaire n'est disponible entre la conception et l'implémentation du modèle. Or, comme le souligne J. Doran : "[any] implementation of a model (...) will likely raise major problems because of the many ways in which particular specified abilities may be refined into computational detail." [Doran, 1997].

Ainsi, confrontés à des ambiguïtés de conception, les informaticiens semblent être les seuls à avoir décidés de solutions (choix de la politique d'exécution et de l'ordonnancement des activités). De nouvelles hypothèses ont été ajoutées au modèle qui ont certainement des répercussions sur les résultats de cette étude. "A partir de là, deux questions surviennent : les experts du domaine sont-ils conscients que ce passage au niveau opérationnel risque d'induire de nouvelles hypothèses sur

leur modèle ?" [Meurisse, 2004]. Ne pouvant pas analyser le modèle Destinie, nous ne sommes pas en mesure de savoir si la gestion du temps influence effectivement les résultats des simulations. Même si des critiques portant sur le domaine ont été publiées, en revanche aucun commentaire ni analyse sur la gestion du temps ne sont disponibles : la gestion du temps apparaît comme un phénomène caché, une technique informatique allant de soi.

Partant du constat que de nombreux travaux de modélisation s'articulent autour d'un thématicien et d'un informaticien, [Meurisse, 2003] et [Vanbergue, 2003] proposent un nouveau rôle : le modélisateur qu'ils considèrent comme un médiateur entre ces deux experts. Je souscris entièrement à cette idée car la modélisation multi-agent nécessite des connaissances fines sur la façon de concevoir un modèle (ou de le co-construire) et d'implémenter un simulateur. Cela ne signifie pas qu'il faille obligatoirement ces trois personnes au minimum pour monter un projet de modélisation multi-agent, mais au moins qu'un des participants maîtrise ces rôles.

5.3.4 Alors... gestion événementielle ou par horloge ?

Comme nous venons de le voir à travers ces quelques exemples, la gestion du temps est un point important des SMA et les techniques d'activation retenues peuvent influencer beaucoup les résultats d'un modèle [Bommel, 1997b; Axtell, 2000 ; Lawson & Park, 2000].

5.3.4.1 Les modèles physiques continus nécessitent une gestion événementielle du temps

En faisant abstraction des critères d'efficacité des temps de calcul, nombreux sont ceux qui considèrent que l'approche événementielle doit être privilégiée [Balci 1988] [Lawson et Park, 2000]. Néanmoins, ils ne rejettent pas l'approche par horloge :

On the other hand, execution efficiency may not be the number one goal of a simulation study and the fixed-time increment TFM (Time Flow Mechanism) may still be chosen just for the sake of easy implementation of the simulation model. [Balci 1988]

L'approche à événements discrets est particulièrement utile pour les simulations à temps-réels et pour décrire des phénomènes continus. Il est par exemple très difficile de simuler des interactions de boules de billard avec une gestion par horloge. Dans [Ferber, 1995] par exemple, l'auteur soulève la question de la collision entre deux mobiles. "Si l'opérateur *Avancer(a, dx, dy)* représente le déplacement d'un corps *a* d'un quantième d'espace représenté par son vecteur $\langle dx, dy \rangle$, comment décrire la rencontre entre deux mobiles et ses répercussions sur la direction et la vitesse des mobiles ?" [ibid.]. Mais pire que cela, la discrétisation du temps provoque généralement une absence de collision. Ainsi, en étudiant le problème de la granularité temporelle, [Michel et al., 2001] montrent que des mobiles peuvent se croiser sans se cogner !

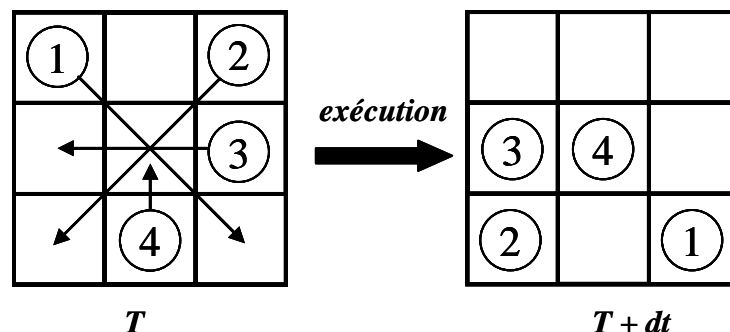


Figure 5-26 : Le problème de la granularité des actions (d'après [Michel et al., 2001]). Les mobiles 1, 2 et 3 se déplacent à des vitesses de deux cases par pas de temps, et le mobile 4, à une vitesse d'une case. Les quatre mobiles se déplaçant vers une position convergente, n'entrent cependant pas en collision.

Comme l'a montré L. Magnin [1996], la modélisation de collisions de balles nécessite une gestion événementielle du temps.

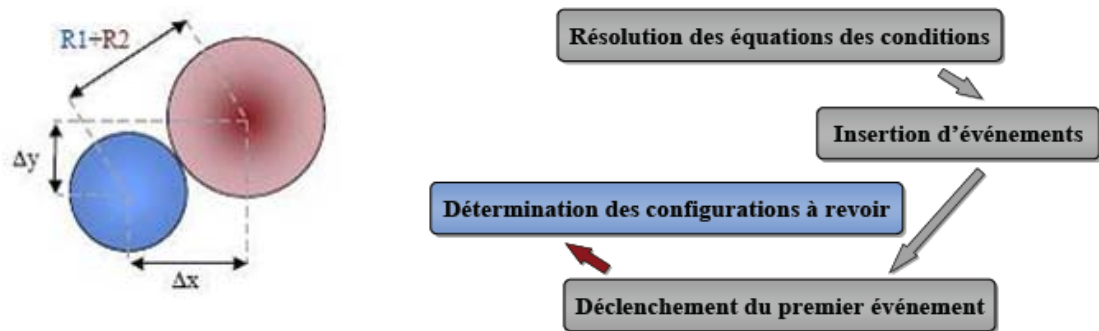


Figure 5-27 : Rebond de balles et gestion événementielle des collisions (d'après [Magnin, 1996])

Le principe que Magnin met en œuvre, consiste à définir des règles de l'environnement et à décrire les collisions entre les balles a priori. Pour déterminer les événements futurs, il calcule au préalable la date où aura lieu la prochaine collision en fonction des trajectoires et des vitesses actuelles. Cet événement est inséré dans l'échéancier et le temps global saute alors à l'événement suivant qui correspond à la prochaine collision.

L. Magnin s'est attaché à la résolution de ce type de problèmes dans le contexte des robots footballeurs. On trouve la même préoccupation dans le problème de la porte à battant que deux robots veulent pousser simultanément et qui a donné lieu à une série d'articles suite à celui de [Ferber & Müller, 1996] sur le modèle "influence – réaction". Il est clair que pour ce genre d'application qui touche entre autres à la multi-robotique, une gestion événementielle du temps est préférable.

5.3.4.2 L'approche à temps continu n'apporte pas d'avantage clair pour la modélisation des ressources renouvelables

Mais dans le cadre de la gestion des ressources, ce souci de réalisme ne paraît pas crucial. En effet, les problèmes que nous étudions, se trouvent généralement à un niveau de définition plus grossier. En s'intéressant à des conflits d'usage d'une ressource naturelle, à des problèmes de gestion de la biodiversité ou à l'émergence de territoires, nous construisons des sociétés artificielles dans lesquelles les interactions entre agents ne nécessitent pas ce degré de réalisme. Par exemple, en changeant d'échelle, nous ne nous préoccupons pas du déplacement réaliste d'un agent-agriculteur dans son territoire, mais nous cherchons plutôt à synthétiser des connaissances sur sa façon de gérer annuellement sa propriété. A cette échelle nous nous permettons des raccourcis qui simplifient la conception. Néanmoins, même dans ce contexte, nous devons garder à l'esprit ces difficultés et employer le formalisme événementiel si besoin. D'ailleurs, de nombreux modèles en écologie ou en gestion des ressources (et des plates-formes) font appel à ces techniques [Michelin & Poix, 1998]. Elles sont d'ailleurs à la base d'une revue spécialisée sur ce sujet : "Discrete dynamics in nature and society".

En comparant les approches par horloge et par événements, [Galler, 1997] relève les avantages et les inconvénients relatifs de chacune. Il étudie ainsi la façon dont les deux approches peuvent traiter la question des événements simultanés et des actions concurrentielles, mais aussi leurs performances respectives en termes de temps de calcul. Sans conclure à une préférence pour l'une ou l'autre, il note cependant que l'approche temps continu n'apporte pas d'avantage clair. Car la mise au point et l'implémentation d'un simulateur événementiel ne sont pas évidentes. Beaucoup d'erreurs peuvent se glisser dans les mesures sans qu'il soit aisé de les détecter. L'auteur conclut alors que pour des raisons pratiques, il vaut mieux utiliser une approche à temps discret, qui simplifie considérablement le développement de simulations, mais avec une granularité de temps

fine. En effet, lorsque les entités d'un modèle sont fortement reliées, "une approche à temps continu se révèle très inefficace car à chaque changement d'état d'une entité, le futur (la prochaine occurrence d'un changement d'état d'une entité) d'autres entités se retrouvent systématiquement invalidées" [Meurisse, 2004].

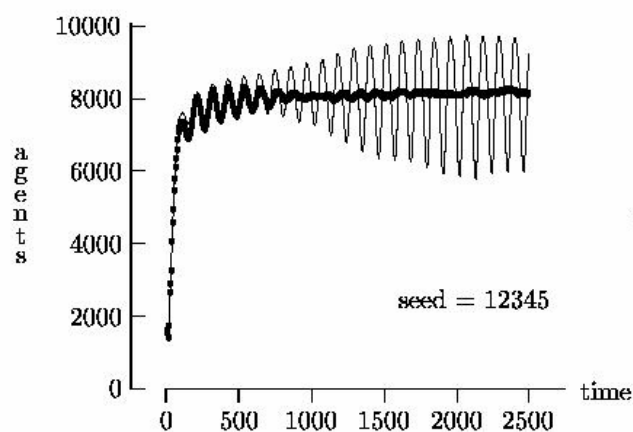
Cependant, on peut minimiser l'impact de la gestion par horloge. De nombreux modèles utilisent cette activation asynchrone randomisée sans que leurs résultats soient pour autant liés à l'ordonnanceur aléatoire. D'autre part, si l'ordre d'exécution des agents est décidé et justifié par le modélisateur, les variations des résultats sont considérées comme étant liées au domaine : tri des agents par ordre de vivacité, de force, de proximité, etc. Dans ce cas, l'ordonnement des agents constitue précisément un élément du modèle. Mais bien des fois, le concepteur du SMA n'a pas conscience des impacts possibles de cet ordonnancement sur les résultats de ses simulations. Les conclusions sur son objet d'étude peuvent s'avérer être un artéfact. Lorsqu'on utilise une gestion par horloge, il est donc indispensable de prêter une attention toute particulière à l'ordonnement des agents et à la granularité du temps.

5.3.4.3 Phénomènes oscillatoires inexpliqués ?

En ré-implémentant Sugarscape⁵² [Epstein & Axtell, 1996], mais en y appliquant une évolution asynchrone, Lawson et Park montrent qu'il vaut mieux utiliser une gestion événementielle qu'une gestion par horloge :

While we agree that synchronous behavior is correct for some applications, such as seasonally motivated movement, many other applications are modeled more accurately using asynchronous time evolution. For such asynchronous applications, forcing events to occur synchronously is unnatural and can produce simulation artifacts. In addition, forced synchronous time evolution produces an ambiguity in the order in which events should occur. Because all events occur randomly at their own characteristic rates, the use of asynchronous time evolution removes any such ambiguity. [Lawson et Park, 2000]

A partir de leurs travaux, Lawson et Park concluent qu'une gestion événementielle convient mieux qu'une simulation par horloge⁵³ pour la modélisation d'une société artificielle. Car, expliquent-ils, la nature nous montre des entités qui agissent à des instants non corrélés du fait de leur autonomie (la notion d'autonomie fait l'objet de chapitre suivant). Ils tirent leur conclusion des résultats non oscillatoires de leur réplique.



⁵² Nous reviendrons en détail sur les problèmes de ré-implémentation au chapitre 9.1.

⁵³ Comme je l'ai déjà signalé, la gestion par horloge classique des SMA peut rarement être considérée comme une gestion synchrone : les agents agissent séquentiellement, les uns après les autres. Contrairement aux automates cellulaires qui, seuls, mettent en œuvre une gestion véritablement synchrone, la gestion classique par horloge doit justement être considérée comme asynchrone.

Figure 5-28 : Comparaison de l'évolution asynchrone et synchrone d'une population d'agents, d'après [Lawson et Park, 2000]. Le trait fin représente l'évolution du nombre d'agents par un traitement synchrone alors que le trait épais montre cette même évolution par gestion asynchrone du temps.

En comparant les approches par "pas de temps" synchrone (type automate cellulaire) et par événements, [Meurisse, 2004] constate aussi des phénomènes d'oscillation. Pour cela, il s'appuie sur un exemple simple dans lequel deux agents *A* et *B* se déplacent sur une grille : *A* souhaite aller sur la case de *B* et *B* sur celle de *A*. Dans le cas d'une gestion asynchrone (par événement ou par horloge), le système converge en un "pas de temps" vers une situation d'équilibre stable : *A* et *B* se retrouvent au même endroit, soit sur la case de *B* si *A* a été activé le premier, soit sur la case de *A* dans le cas contraire. Par contre, lors d'une gestion synchrone, *A* et *B* se croisent indéfiniment sans jamais se rencontrer. [Meurisse, 2004] explique que :

"Des résultats similaires ont été remarqués lors d'essais de reproductions d'expérimentations de Sugarscape par Lawson et Park [Lawson et Park, 2000]. En effet, les résultats de simulations originels ne convergent pas, mais semblent contenir des oscillations difficilement explicables. Ce type de phénomènes pourrait expliquer cette absence de convergence.

Au chapitre 9.1 qui traite de la réplique, nous reviendrons sur les différentes expériences de réplique de Sugarscape par [Lawson et Park, 2000], [Meurisse, 2004] et [Michel, 2004]. Mais dans le cadre de ce chapitre, il est nécessaire d'en discuter certains points.

Même si je suis en accord avec Lawson et Park sur le problème des artefacts qu'ils relèvent, nous verrons plus loin que l'ajout d'une période de gestation dans leur modèle, censé être une réplique du modèle d'Epstein et Axtell, constitue une modification du modèle initial et change évidemment les résultats de ce dernier. Or, ceci minimise la portée de leur démonstration. Néanmoins, de nombreuses expériences de réplique de Sugarscape ont montré des différences significatives. En particulier, l'analyse "des variations de contraintes d'ordonnancement entre comportements dans Sugarscape tend à montrer que certains choix d'implémentation, classiquement laissés à la discrétion de l'expert informatique, ne sont pas neutres quant aux résultats de simulations" [Meurisse, 2004]. En termes de réplique de modèles, les procédures d'activation des agents est un sujet régulier de discussion car leur manque de description est souvent à l'origine des divergences de résultats.

Cependant, comme le souligne [Michel, 2004] qui a également répliqué ce modèle, il faut chercher les raisons de ces oscillations. Il réfute les conclusions apportées par Lawson et Park en expliquant que ces phénomènes oscillatoires sont dus à l'homogénéité des conditions initiales, couplée aux contraintes spatiales du système. En fait, ces oscillations correspondent à des phénomènes de morts massives d'agents ou de naissances d'un très grand nombre d'individus. Or, la ressource étant abondante à l'initialisation, "la véritable ressource critique du système est l'espace. L'extinction d'un très grand nombre d'agents (phase descendante), entraîne une nouvelle disponibilité d'espace. Ceci engendre naturellement un très grand nombre de naissances du fait de la place disponible et ainsi un nombre important de nouveaux agents (phase montante). Ces nouveaux agents vont occuper l'espace et réduire de fait le nombre de naissances. Mais ils vont aussi tous mourir approximativement au même moment, c'est-à-dire en quelques itérations. Ce qui va créer une phase descendante et ainsi produire un cycle dans la dynamique de la population. C'est pourquoi, une première oscillation suffisamment forte à toutes les chances de rendre le système définitivement instable" [ibid.].

En mode asynchrone par événements, ce phénomène d'oscillation est amorti par le fait qu'un agent peut être activé plus souvent qu'un autre sur une période de temps donnée. Ceci est lié à la génération des événements qui suit une loi de Poisson. Statistiquement les agents sont activés autant de fois les uns que les autres. Mais sur une période de temps donnée, un agent peut agir plus fréquemment et donner ainsi naissance à plusieurs individus. Par ce procédé, les naissances se trouvent alors distribuées de façon plus homogène dans le temps. Contrairement à la gestion par horloge, le mode événementiel amortit les oscillations des effectifs en atténuant progressivement

l'uniformité de la population initiale. Ces constats sont confirmés par les expérimentations de Michel. Je les ai également répliquées (cf. chapitre réplique).

5.3.5 Résolution de conflit : aucune politique de gestion n'y échappe

Pour résoudre les problèmes de biais liés à l'ordonnancement des activations, on peut diviser le "pas de temps" en deux parties distinctes, l'une liée à la perception des agents et l'autre liée à l'action. Dans le même ordre d'idée, Travers propose de simuler le parallélisme en utilisant les artifices mis au point pour les automates cellulaires, c'est-à-dire par l'emploi de variables tampons (dynamique de type Moore). L'intérêt ici est de permettre aux agents de percevoir le même état du monde, en reportant la validation de leurs actions (c'est-à-dire des changements d'état des agents) à la fin du pas de temps. Mais, comme le notent [Travers, 1996] lui-même et [Michel et al., 2001], aucune de ces solutions, ni aucune des deux approches (synchrone ou asynchrone) ne règlent le conflit qui survient lorsque deux agents ou plus souhaitent modifier une même variable :

In addition, there is a serious drawback : if an agent modifies a variable, it cannot make use of it in further computation without obtaining an incoherent result, knowing that the variable value is only validated at the end of a cycle [...]. A conflict occurs when two or more agents try to specify different values for the same slot. If this happens under the system as described above, we will again suffer order-dependencies among the agents (since the last agent to run during phase 1 will be the one that ends up supplying the new value). [Travers, 1996].

On pense par exemple à l'appropriation d'une ressource unique par plusieurs agents ou à des déplacements simultanés en un même endroit. Sans conclure à une gestion du temps au détriment d'une autre, on constate que, quelle que soit la solution envisagée, aucune ne permet de faire l'impasse sur une gestion des conflits d'accès à une ressource. Ce n'est pas un problème technique : cette gestion du conflit demande un investissement du modélisateur.

Parce qu'elle est la plus simple, la méthode la plus utilisée pour résoudre ces conflits consiste à tirer aléatoirement parmi les agents concurrents celui qui finalement s'appropriera la ressource. Nous retrouvons alors les problèmes énoncés précédemment car cette stratégie est équivalente à une simple gestion asynchrone randomisée. Par contre, il est nécessaire d'analyser les impacts de ce tirage aléatoire sur les résultats de simulation. Comme Travers le souligne, l'intérêt d'une gestion de type Moore est qu'elle oblige le modélisateur à expliciter sa stratégie pour résoudre les conflits.

D'autres méthodes consistent à trier les agents selon un ordonnancement qui constitue précisément un élément du modèle. Dans le secteur de la pêche par exemple, pour déterminer l'ordre de retour au port, on peut classer les agents en fonction de la distance et aussi de la puissance des bateaux. A ce sujet, le principe de la limitation de l'effort de pêche ne s'accompagne pas comme on pourrait s'y attendre, d'une diminution de la puissance des navires, bien au contraire. Comme le font remarquer plusieurs auteurs dont [FAO, 2001], suite à l'application des quotas, la compétition pour l'accès aux ressources en poisson s'est déplacée vers une compétition pour le retour au port : la vente du poisson est davantage profitable au premier pêcheur arrivé à la criée. Ce n'est plus la pêche en elle-même mais la course au retour au port qui entraîne une surpuissance des engins de pêche. Dans un modèle, on peut judicieusement insérer cette donnée importante, par un tri adéquat des agents.

Il semble difficile, a priori, de spécifier l'ensemble des conflits qui peuvent survenir lors d'actions. Néanmoins, la gestion de conflits d'accès à une ressource ne peut pas être résolue par une technique informatique : elle implique une solution de modélisation clairement explicitée.

5.3.6 Les plates-formes multiprocesseurs ne constituent pas une solution

Dans la "vraie vie", les individus agissent souvent simultanément. Pour gérer l'évolution simultanée d'une population d'agents, certains auteurs expliquent qu'une utilisation large des

architectures multiprocesseurs permettra de résoudre les problèmes évoqués ci-dessus. On pense alors à la possibilité d'avoir un processeur par agent. Nous retrouvons ce regret exprimé par Epstein et Axtell [Epstein and Axtell, 1996, p. 26] :

Each agent is permitted to move once during each artificial time period. The order in which agents move is randomized for each time period.

footnote 12: All results reported here have been produced by running the model on a serial computer; therefore only one agent is active at any instant. In principle, the model could be run on parallel hardware, permitting agents to move simultaneously (although M would have to be supplemented with a conflict resolution rule to handle cases in which two or more agents simultaneously decide to inhabit the same site). Whenever one simulates on a serial machine processes that occur in parallel, it is important to randomize the agent order periodically to ensure against the production of simulation artifacts.

Pour les auteurs de Sugarscape, la gestion du temps nécessite un choix entre une approche séquentielle ou parallèle. Obligés d'implémenter leur modèle sur une machine séquentielle, ils déplorent leur impossibilité du moment à utiliser une machine parallèle de type MIMD (Multiple Instruction Multiple Data) qui, selon eux, leur permettrait d'exécuter la simulation de manière complètement parallèle. En accord avec [Meurisse, 2004], "nous pensons que cette argumentation est inexacte. Les capacités de la machine en termes de parallélisme de programme n'influent en rien le choix du modèle opérationnel d'activation des agents au sein d'une simulation".

MAS paradigm is founded implicitly on the composition of concurrent individual behaviours. Moreover multiprocessors architectures do not provide an obvious solution: without synchronization, agents evolve at the rate of their internal architecture complexity. Then it is not possible to control the coherence of the entire system. Thus all the solutions planned to simulate entities concurrency generate more or less skews in the simulation course. In other words the computation of this particular point has depth influence on the evolution of MAS models whereas its neutrality should be wished [Michel et al., 2001].

Au contraire, gérer la cohérence temporelle est bien plus problématique sur un système multiprocesseur (fortement ou faiblement couplés). Pour cette solution, et sans synchronisation des activités, les agents évoluent à leur rythme, c'est-à-dire en fonction de la complexité computationnelle de la tâche qu'ils sont en train d'accomplir et non pas à la vitesse que demanderait réellement cette tâche, dans le modèle [Resnick, 1990]. On retrouve des problèmes similaires avec les traitements multi-threadés qui permettent de simuler le parallélisme sur une machine séquentielle. Chaque thread (un processus actif) permet par exemple d'encapsuler des comportements d'agents et de les exécuter de manière concurrente. Toutefois, la gestion des threads est également délicate car le grain de décomposition de concurrence des processus légers ne peut être manipulé aisément. Pour les simulations distribuées, le problème s'aggrave par les effets de latence du réseau et selon les vitesses des processeurs (qualités différentes, charges hétérogènes, etc)⁵⁴.

Pour ces architectures multiprocesseurs, distribuées ou multithreadées, la cohérence du monde simulé est encore plus difficile à maintenir contrairement aux idées reçues. Un travail important de synchronisation est à mener : si des activités peuvent se dérouler indépendamment les unes des autres, il est nécessaire de synchroniser les agents quand ceux-ci interagissent. En phase de synchronisation, on se retrouve avec les mêmes problèmes que dans les situations classiques. "Et nous retombons sur le problème de gestion d'activités multiples sur des ressources communes, et donc de la résolution de conflit" [Meurisse, 2004].

⁵⁴ Au début de ma thèse, j'avais travaillé sur ces problèmes de simulations distribuées sur Internet dans le cadre de la mise en place de jeux vidéo interactifs en ligne, voir [Michel et al., 2002].

5.3.7 Problème de simultanéité ou problème d'interaction ?

D'après [Michel, 2004], "que le modèle utilise un modèle du temps discret ou un principe événementiel, la véritable question qui se pose est celle de la représentation de la simultanéité des actions". En s'attaquant à ce problème, [Zeigler et al., 2000] écrivent que la gestion de la simultanéité des systèmes composés nécessite une solution formelle pour parvenir à des dynamiques contrôlées. Ils proposent alors une extension au formalisme DEVS appelée *Parallel DEVS* qui augmente la formalisation initiale de la dynamique d'un modèle couplé d'une fonction supplémentaire appelée "influent transition function" : δ_{con} . Cette fonction oblige le modélisateur à fournir une véritable sémantique à une résolution de conflit.

Mais de mon point de vue, la question n'est pas tant la simultanéité des actions que la gestion des interactions. Des actions simultanées indépendantes peuvent être gérées en parallèle ou de façon séquentielle, peu importe. Si par exemple, un agent *A* décide de labourer une parcelle et que dans le même temps, un autre agent *B* choisit de récolter sa culture, on peut adopter n'importe quelle gestion, parallèle ou séquentielle, pour exécuter ces deux procédures. Au final, l'action de chaque agent restera inchangée, car *A* et *B* agissent indépendamment sur leur parcelle respective. Mais aucune technologie ne peut résoudre automatiquement le problème de l'interaction et de la gestion de conflit. Si *A* et *B* décident d'utiliser la même parcelle au même moment, la résolution de ce conflit ne peut être résolue automatiquement par aucune technique. C'est au modélisateur d'imaginer le déroulement de cette interaction et de faire des choix explicites.

Ce constat appuie les réflexions de J. Ferber qui estime que les interactions sont fondamentales dans l'intégration des agents au sein d'une organisation et qui considère la discipline SMA comme une *science de l'interaction* :

"Les systèmes d'interaction constituent ainsi l'objet d'étude essentiel des systèmes multi-agents et servent à articuler le rapport qui existe entre l'agent d'une part et l'organisation dans sa globalité d'autre part" [Ferber, 1994]

Pour être plus précis encore, analysons l'exemple simple qui suit.

5.3.8 Un exemple : le pompier incompetent

Cet exemple provient d'un exercice que nous appliquons dans le cadre de la formation à la gestion des ressources renouvelables et des systèmes multi-agents. L'objectif est de réaliser un simulateur, de la conception du modèle jusqu'à son implémentation. Ici, nous nous focalisons sur un point précis de l'exercice : un feu se propage de proche en proche dans une forêt-galerie (la forêt est une sorte de mince bande boisée). Un agent pompier, aveugle, se déplace aussi, de l'Est vers l'Ouest. Lorsqu'il tombe sur une surface en feu, il l'éteint. Le feu et le pompier se déplacent à la même vitesse dans des directions opposées. Immanquablement, ils devraient se croiser.

On peut interpréter cet énoncé de plusieurs façons. Il est donc important de le formaliser un peu mieux. Tout d'abord, la "surface" en feu véhicule l'idée que l'espace est partitionné. On peut admettre qu'il peut être assimilé à un automate cellulaire constitué d'une seule ligne. La fonction de transition est la suivante : si une cellule est dans l'état "forêt" et qu'au moins une de ses voisines est en "feu", alors elle deviendra en "feu" à son tour. Si elle est vide ou en cendre, son état ne peut changer. Si elle est en feu, elle s'éteindra d'elle-même ou par l'action du pompier et se transformera en cendre. Le diagramme d'état-transition ci-dessous résume tous les états possibles d'une cellule et les événements qui provoquent les changements d'état :

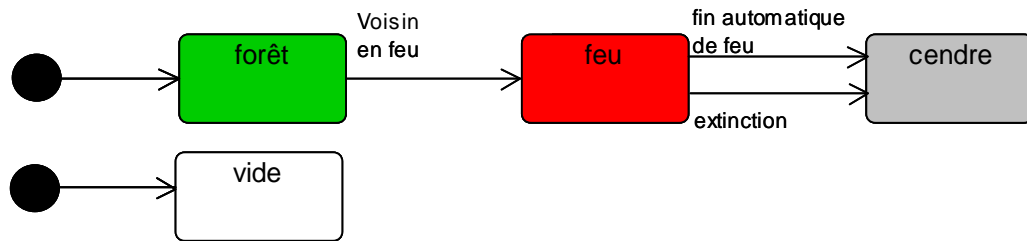


Figure 5-29 : diagramme d'état-transition d'une cellule (fireDiffusion).

Pour simuler la propagation du feu, on peut tout aussi bien définir un espace parcellé et une entité Feu s'y déplaçant de cellule en cellule, et changeant sur son passage la forêt en cendre. Dans ce cas, le Feu n'ayant qu'un seul état, il faut utiliser un autre type de diagramme pour représenter sa dynamique :

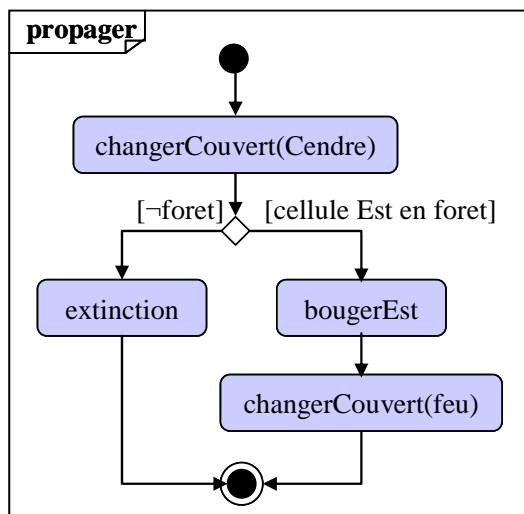


Figure 5-30 : Diagramme d'activité de la propagation d'une entité Feu

A chaque pas de temps, le feu change l'état de la cellule sur laquelle il se trouve : il supprime l'ancien couvert et y installe de la cendre. Si la cellule voisine à l'Est est en forêt, alors il s'y déplace et change le couvert Forêt en Feu, sinon il meurt.

Le pompier, situé sur une portion de cet espace, se déplace vers la gauche. S'il se trouve sur une cellule en feu, il l'éteint. Le diagramme d'activité suivant montre ce comportement :

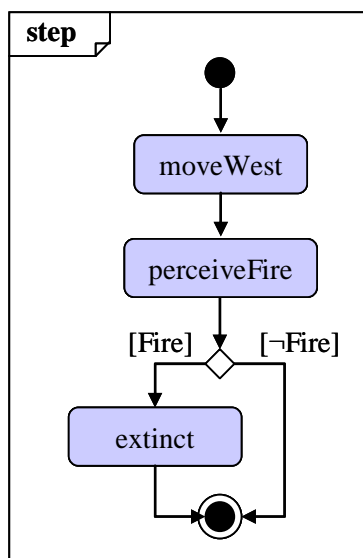


Figure 5-31 : Diagramme d'activité de l'agent pompier (step)

Il y a plusieurs manières de gérer le temps de ce modèle. Nous en présentons quatre qui mettent en évidence l'impact de gestions par horloge asynchrones et synchrones.

5.3.8.1 Gestion asynchrone A₁

Par "pas de temps", l'ordonnanceur active d'abord la propagation du feu⁵⁵, puis il active le pompier qui se déplace et éteint le feu en suivant le diagramme d'activité précédent. Le diagramme de séquence ci-dessous décrit le déroulement du temps au cours d'un "pas de temps" et montre l'asynchronie des activités du feu puis du pompier.

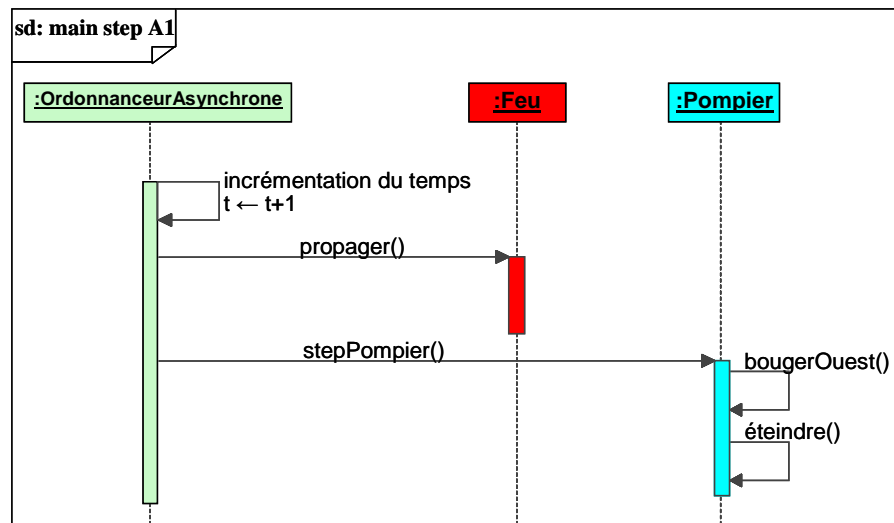


Figure 5-32 : Diagramme de séquence du pas de temps principal de l'ordonnanceur asynchrone A1.

5.3.8.2 Gestion asynchrone A₂

Ici, l'ordonnancement est inversé : l'ordonnanceur active d'abord le pompier (stepPompier) puis active la propagation du feu (propager).

5.3.8.3 Gestion synchrone S₁

Par "pas de temps", l'ordonnancement active simultanément la propagation du feu *et* le déplacement du pompier. Ces deux actions étant indépendantes, on peut choisir de les exécuter en parallèle par le déclenchement de deux threads indépendants par exemple. Le diagramme de séquence suivant décrit ce déroulement.

⁵⁵ Si on choisit l'option automate cellulaire pour simuler une diffusion du feu, cette propagation (synchrone) s'effectue en deux temps : changement de l'état tampon, puis mise à jour de l'état visible pour toutes les cellules

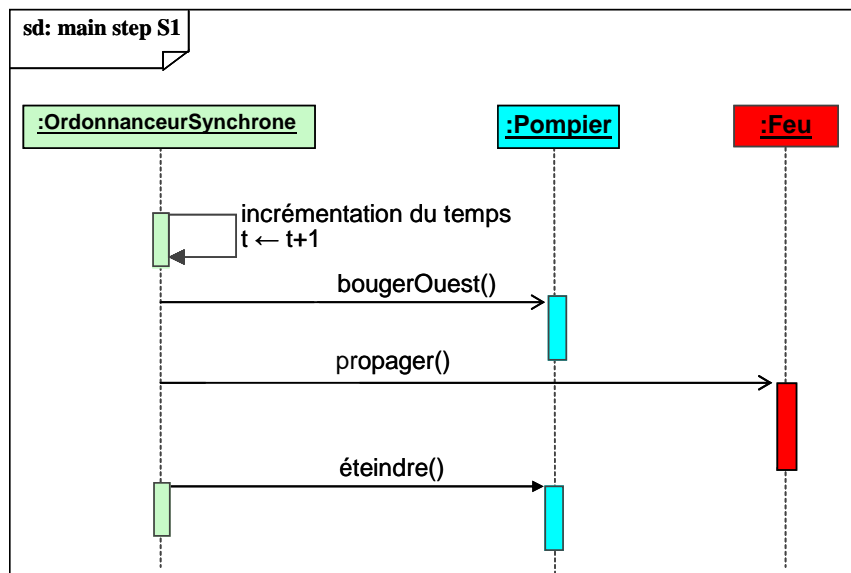


Figure 5-33 : Diagramme de séquence du pas de temps principal de l'ordonnanceur synchrone S1. Au sens d'UML, les flèches symbolisent les messages qui transitent d'une entité vers l'autre. Si l'extrémité de la flèche est pleine, le message est synchrone : cela signifie que l'entité appelante est bloquée jusqu'à la fin de l'exécution du message envoyé. Si l'extrémité de la flèche est creuse, le message est asynchrone : l'entité appelante n'est pas bloquée; elle peut continuer ses activités (envoyer d'autres messages) sans attendre que l'entité exécutant le message ait fini son traitement.

De mon point de vue, les diagrammes de séquence ne permettent pas de bien représenter les processus parallèles. Sur la figure précédente, l'envoi de messages asynchrones est peu visible. De plus, ces diagrammes ne permettent pas de différencier les phases de synchronisation et de désynchronisation. Je leur préfère les diagrammes d'activité que je trouve plus explicites :

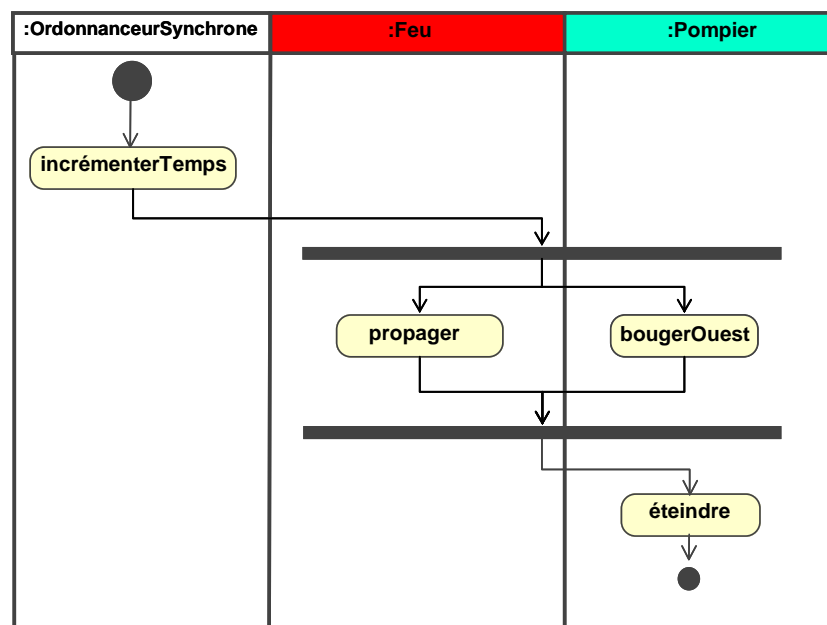


Figure 5-34 : Diagramme d'activité du pas de temps principal de l'ordonnanceur synchrone S1. Les couloirs de notation (swimlanes) permettent de séparer les activités selon les objets qui les exécutent. Les barres de synchronisations permettent d'identifier les activités synchrones (en haut et en bas) des activités asynchrones ou parallèles (au milieu).

On aura noté que j'ai retiré l'activité "éteindre" du pompier, des déroulements en parallèle. En effet, cette extinction implique l'interaction du pompier et du feu. Or, au cours de processus en parallèles, on ne connaît pas avec certitude l'état d'un objet avant que le processus soit terminé. Il peut se trouver dans un état qui n'a pas encore changé ou dans un état transitoire ou dans un nouvel état. Ainsi, l'état de la cellule sur laquelle arrive le pompier, n'est pas forcément défini; cela dépend

de l'exécution du thread. Si le feu et le pompier sont censés arriver au même moment sur une cellule, l'extinction du feu par le pompier peut, au final, relever d'un tirage aléatoire. C'est pour cette raison que l'activité "éteindre" a été déplacée après la synchronisation des déplacements, car alors, l'état de la cellule sur laquelle se trouve le pompier est connu avec certitude.

5.3.8.4 Gestion synchrone S_2

L'ordonnancement est inversé par rapport à S_1 : l'ordonnancement lance d'abord l'activité "éteindre" puis, simultanément les activités "propager" du feu *et* "bougerOuest" du pompier.

5.3.8.5 Résultats

A partir de deux configurations spatiales initiales (EI_1 et EI_2), les quatre gestions du temps (A_1 , A_2 , S_1 et S_2) sont déroulées sur trois pas de temps (t_0 , t_1 , t_2). La figure suivante en montre les résultats.





















	<div> <div> <div>▲ Pompier</div> <div>■ Forêt</div> </div> <div> <div>■ Cendre</div> <div>□ Vide</div> </div> <div> <div>■ Extinction</div> <div>■ Feu</div> </div> </div>		État initial EI_1	État initial EI_2
				
Asynchrone A_1 <i>stepDiffusion</i> puis <i>stepPompier</i>	EI_1-A_1		 t_0	 t_0
			 t_1	 t_1
			 t_2	 t_2
Asynchrone A_2 <i>stepPompier</i> puis <i>stepDiffusion</i>	EI_1-A_2		 t_0	 t_0
			 t_1	 t_1
			 t_2	 t_2
Synchrone S_1 et S_2	$EI_1-S_1 S_2$		 t_0	 t_0
			 t_1	 t_1
			 t_2	 t_2

Figure 5-35 : 6 scénarios du modèle "Pompier incompetent". A partir de deux états initiaux différents (EI_1 et EI_2), 4 modalités de gestion du temps sont représentées sur 3 pas de temps (t_0 , t_1 , et t_2) : gestions asynchrones A_1 et A_2 ; gestions synchrones S_1 et S_2 (S_1 et S_2 montrent les mêmes résultats sur EI_1 et EI_2).

Le feu et le pompier se déplaçant à la même vitesse dans des directions opposées, nous pensions qu'ils se rencontreraient "immanquablement". Or quelle que soit la gestion envisagée, on remarque pour chacune, une configuration de non-rencontre : EI_2-A_1 , EI_1-A_2 , EI_2-S_1 , et EI_2-S_2 . Déjà aveugle car ne pouvant pas percevoir l'espace autour de lui, notre pauvre pompier semble bien incompetent ! Et l'emploi d'une gestion synchrone des déplacements n'a pas réglé ce problème. En effet, les gestions synchrones S_1 et S_2 donnent des résultats similaires à la gestion asynchrone A_1 . A ce sujet, malgré l'aspect cyclique de la gestion par horloge qui peut faire penser que le début ou la fin n'ont pas d'importance, on constate ici que ce n'est pas le cas. La gestion A_1 , qui semble intuitivement la plus correcte, donne les mêmes résultats que les gestions synchrones S_1 et S_2 .

Comme expliqué précédemment, une gestion complètement parallèle (déplacement et extinction en même temps que propagation) n'aurait pas résolu ce problème de non-rencontre : en partant de la configuration initiale EI_1 par exemple, nous aurions obtenu aléatoirement des situations finales du type EI_1-A_1 (rencontre) ou EI_1-A_2 (non-rencontre). Plus grave encore, nous n'aurions pas dans ce cas, la possibilité de contrôler ce tirage aléatoire.

5.3.8.6 Une solution : réviser l'activité du pompier

Le diagramme d'activité du pompier, présenté initialement (figure 5-31) doit être révisé pour éviter ces phénomènes de croisement sans rencontre. On peut penser à un comportement qui intègre deux tests: l'un, avant le déplacement et l'autre, après.

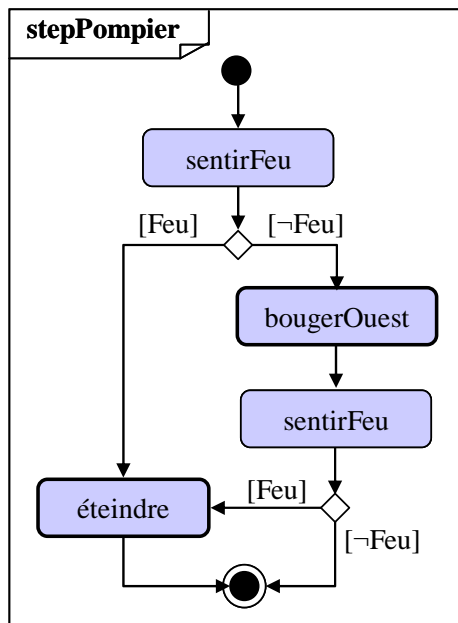


Figure 5-36 : Diagramme d'activité révisé de l'agent pompier.

On peut considérer que l'activité "sentirFeu" est une action instantanée et que les actions de bases du pompier, qui prennent un minimum de temps, sont "éteindre" ou "bouger" (en gras sur la figure). Ici, par "pas de temps", il fait l'une ou l'autre. Ce comportement, à peine plus compliqué que celui précédemment décrit, déclenche une rencontre et une extinction pour chaque configuration et pour chaque type de gestion du temps.

La question n'est donc pas tant la simultanéité des actions, mais la gestion des interactions. Aucune technologie ne peut résoudre automatiquement ce problème de gestion des interactions. Il ne doit pas être laissé à l'appréciation, seule, de l'informaticien qui n'a pas forcément conscience de ses impacts sur les résultats et la qualité du modèle. Il requiert plutôt la faculté du modélisateur qui, par expérience, connaît les points sensibles d'une simulation, sait les anticiper et est capable d'imaginer des interactions sans biais.

5.3.8.7 Gestion événementielle

On pourrait aussi concevoir une gestion événementielle pour ce modèle. Dans ce cas, on peut penser à un espace non-discret sur lequel un feu (une aire mobile en feu) et le pompier avancent de façon continue. A partir d'une configuration initiale, étant donnée la position et la vitesse de chacun, l'environnement est capable de déterminer le point et le moment de rencontre. Il est alors capable de créer un événement à cette date qui déclenchera l'activité "éteindre" du pompier. Si cette solution est acceptable, elle s'éloigne à mon avis du paradigme agent. Le système est entièrement contrôlé par une seule entité, l'environnement, qui possède une vision globale, anticipe tous les événements et ne laisse aucune autonomie aux agents.

Le laboratoire "Systèmes Physiques pour l'environnement" de l'université de Corse a beaucoup travaillé sur la modélisation des feux de forêt. Ils utilisent le formalisme DEVS et ont développé

des outils de simulation du feu. A noter que le "pas de temps" qu'ils utilisent est de l'ordre de 0,01s à 10^{-5} s. Le maillage est de 1 cm^2 et sur 1 m^2 de grille initiale, 200 000 messages sont échangés par pas de temps [Muzy et al., 2005] [Muzy, 2001] ! Il est clair qu'ici, nous ne parlons plus du même modèle caricatural décrit plus haut. Déplorant la longueur des temps d'exécution, les auteurs ont d'ailleurs imaginé une structure dynamique ne prenant en compte que les cellules en combustion.

5.4 CONCLUSION DU CHAPITRE

La modélisation du temps reste un aspect très sensible pour celui qui veut concevoir des simulations. Or il n'y a pas de solution générale pour choisir une gestion du temps plutôt qu'une autre. En fonction des questions qu'il s'est posées au début du processus de modélisation, le concepteur d'un simulateur doit choisir un type de gestion du temps approprié. A notre échelle, le temps semble s'écouler de façon continue même si des épisodes saisonniers surviennent régulièrement. Pour traiter des problèmes physiques continus, tel que des mouvements et des collisions de boules, certains préféreront utiliser des outils mathématiques de type équations différentielles, tandis que d'autres choisiront des systèmes multi-agents événementiels. Pour de tels problèmes, ces outils sont indispensables, mais leur mise en œuvre est délicate et des erreurs peuvent facilement survenir. Pour la gestion des ressources renouvelables, une telle démarche ne paraît pas nécessaire car les systèmes étudiés révèlent surtout des phénomènes discrets qui ne nécessitent pas forcément un traitement fin et réaliste. De plus, la mise en œuvre de simulateurs séquentiels semble plus simple et mieux indiquée. D'ailleurs, nombreux sont ceux qui optent pour une gestion du temps par horloge.

Souvent, un brassage aléatoire des activations permet de limiter les biais liés à l'ordonnancement figé des agents. Parfois, un tri judicieux des agents, en fonction d'un critère intrinsèque au modèle, permet d'assumer pleinement un choix de gestion séquentielle. A condition d'avoir conscience des biais potentiels qui peuvent survenir, des solutions simples existent. Malheureusement trop peu de modélisateurs connaissent les travers qu'une telle gestion du temps peut parfois entraîner. Or ce problème n'est pas négligeable car il peut être à l'origine de critiques virulentes envers les SMA. Les études de sensibilité, mais également les expériences récentes de répliquations de modèles ainsi que le colloque M2M dédié à ce sujet, annoncent un début de prise de conscience de la communauté multi-agent sur ces risques.

Il se trouve que les problèmes soulevés par la gestion du temps sont fortement liés à la gestion des interactions. Lorsque plusieurs agents souhaitent modifier un objet en même temps (appropriation d'une ressource unique, déplacements simultanés en un même lieu, utilisation conjointe d'un tracteur, accès simultanés à un point d'eau, etc.), des conflits apparaissent qui ne peuvent être résolus ni par des traitements événementiels, ni par la gestion par horloge. On comprend alors que les problèmes énoncés ici s'avèrent en étroite relation avec la notion d'autonomie des agents. Cette question fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 6

LA NOTION D'AUTONOMIE

Comme il a été discuté précédemment, les problèmes de gestion du temps se cristallisent finalement autour des interactions. Or ces dernières s'avèrent étroitement liées à la notion d'autonomie des agents. D'ailleurs, certains pensent que cette question, régulièrement débattue, doit prendre une place essentielle au sein des SMA.

Au cours de nombreuses discussions avec Fabien Michel sur ce sujet, nous sommes tombés d'accord sur la difficulté de gérer le temps et les interactions entre les agents. Dans sa thèse, [Michel, 2004] préconise alors de renforcer l'autonomie des agents par des architectures informatiques adéquates. Si je ne suis pas partisan de telles solutions pour la modélisation des ressources renouvelables, il faut néanmoins reconnaître que des interactions directes entre agents peuvent entraîner des biais sérieux. Ce chapitre présente donc la problématique de l'autonomie pour les SMA et les principales solutions informatiques proposées.

6.1 QUELLES AUTONOMIES ?

Comme expliqué au chapitre 3, les recherches sur les SMA portent essentiellement sur les questions de coordinations entre agents qui sont habituellement traitées comme des problèmes de contrôle et de communication. Or il s'avère que de nombreux biais liés à la gestion du temps touchent en définitive *l'autonomie* des agents. Il est intéressant de constater que la littérature récente prend davantage en compte cette notion. Ainsi le terme autonomie n'apparaissait pas explicitement dans la définition de l'agent qu'en donnait J. Ferber en 1988 (cf. chap. 3.2, page 61) [Ferber, 1988]. A partir de l'article [Ferber & Müller, 1996] sur le modèle "influences – réaction" qui a servi de base de réflexion pour la thèse de F. Michel, la notion d'autonomie a pris de plus en plus d'importance.

Etymologiquement, une entité est définie comme autonome si elle est animée par des lois qu'elle a elle-même édictées (auto-nomos). Mais cette notion reste encore floue et sa définition change en fonction des auteurs. [Gouaïch, 2003] identifie deux interprétations distinctes de ce terme dans la littérature concernant les SMA. Une première définition s'attache à décrire ce qu'est l'autonomie pour un individu et la transpose ensuite à l'agent, tandis qu'une autre s'intéresse essentiellement à ses aspects informatiques.

6.1.1 Autonomie biologique et sociale

La première notion est associée à la dimension biologique et sociale de l'agent. Pour [Steels, 1995], l'autonomie est une propriété intrinsèque à tout être vivant qui doit maintenir son intégrité dans un environnement en perpétuelle évolution. Dans les SMA, perçus comme une métaphore de l'organisation sociale, les agents informatiques doivent donc émuler cette attitude :

“Because [the agents] have to worry about their own survival they need to be autonomous, both in the sense of self-governing and of having their own motivations.” [Steels, 1995]

Ils doivent notamment être capables de s'adapter à un environnement fluctuant en conservant leurs propres objectifs. D'après L. Steel, l'autonomie est indissociable de la notion de pro-activité (goals-directed behaviour). Selon lui, il n'existe aucun système véritablement autonome. Dans le même esprit, [Weiss, 1999] considère que l'autonomie d'un agent relève partiellement de son expérience.

En approfondissant encore cette notion et pour chercher à définir ce qu'est la Vie, Maturana et Varela abordent l'autonomie à travers le principe d'autopoïèse (du grec *auto* *soi-même* et *poïesis* *production, création*). Ils caractérisent le vivant par sa capacité à s'auto-produire continuellement, c'est-à-dire à se maintenir, voire à se définir lui-même. Ils expliquent qu'un système est autonome s'il est autopoïétique, c'est-à-dire s'il est constitué d'un ensemble de composants dont les transformations et les interactions ne cessent de reproduire l'organisation dont ils sont les composants :

"Il s'ensuit qu'une machine autopoïétique engendre et spécifie continuellement sa propre organisation. Elle accomplit ce processus incessant de remplacement de ses composants, parce qu'elle est continuellement soumise à des perturbations externes, et constamment forcée de compenser ces perturbations. Ainsi, une machine autopoïétique est un système homéostatique [...] dont l'invariant fondamental est sa propre organisation (le réseau de relations qui la définit)".
[Maturana & Varela, 1994]

Entre d'un côté, un idéalisme proche du solipsisme⁵⁶ qui prône l'absence d'objectivité et où tout est possible, et de l'autre côté, la pensée représentationniste⁵⁷ qui laisse supposer que l'environnement imprime ses objets dans le système nerveux, Varela et Maturana montrent à travers la notion d'autonomie comment l'objet d'étude est toujours indissociable de l'acte de connaissances. Ils remettent en question l'existence d'une réalité objective, indépendante de la manière dont on l'aborde. Par analogie, l'autonomie peut se voir comme la membrane qui sépare une cellule du milieu dans lequel elle vit : une séparation semi-perméable jouant un rôle bien plus important que celui de simple ligne de démarcation⁵⁸. Sur la base de cette théorie, [Stewart, 2002] propose d'aborder la modélisation en biologie sur un mode distinct de la modélisation en physique⁵⁹.

Dans cette optique, on peut également qualifier l'autonomie d'un agent vis-à-vis des contraintes sociales (niveau macro) sur chaque individu (niveau micro), ce que N. Gilbert décrit sous le terme d'*émergence de second ordre* [Gilbert, 1995] : face à un collectif voire une institution, un agent ne peut être considéré comme une entité autonome indépendante de son environnement social.

En étudiant la notion de réputation, R. Conte montre bien que le regard du collectif entrave l'autonomie de l'individu qui doit se plier à son environnement social [Conte et Castelfranchi, 1995], [Conte et Paolucci, 2002]. Une plate-forme de simulation est même dédiée à ce sujet [Sabater et al. 2006]. J. Sichman, lui, étudie la dépendance d'un agent au sein de son réseau social (The Social Dependence Network) [Sichman et al. , 1994]. Il évalue le degré d'indépendance d'un agent vis-à-vis de ses accointances. En produisant des graphes relationnels, il crée des hiérarchies de relations entre agents, basées sur des degrés d'autonomie - dépendances. Dans cette classification, un agent est complètement autonome s'il ne dépend de personne pour accomplir ses

⁵⁶ Le solipsisme (du latin *solus*, seul et *ipse*, soi-même) est une vue philosophique qui exprime une attitude d'un être pour qui la conscience propre est l'unique réalité. Il soutient que tous les objets et les événements perçus sont simplement les produits de la conscience personnelle et que seule cette conscience est vraie.

⁵⁷ Le représentationnisme considère que la connaissance s'appuie sur une perception de la réalité comme quelque chose d'indépendant du sujet. Selon ce point de vue, "le système nerveux est un instrument par lequel l'organisme obtient de l'information, information qu'il utilise alors pour construire une représentation du monde. [...] l'environnement imprime sur le système nerveux des caractéristiques qui lui sont propres, et le système nerveux utilise ces caractéristiques pour produire un comportement" [Maturana & Varela, 1994].

⁵⁸ La membrane (encore appelée clôture opérationnelle) circonscrit le réseau de transformations tout en continuant de participer à l'auto-production de la cellule. La membrane ne se contente pas de délimiter ce réseau, mais elle participe elle-même à ce réseau. La vie de la cellule dépend de l'intégrité du processus. "Interrompez (à n'importe quel point) le réseau du métabolisme cellulaire et bientôt vous observez que l'unité n'existe plus".

⁵⁹ La modélisation en physique est basée sur des systèmes dynamiques déterminés par leurs états (SDDE). L'autopoïèse et la causalité circulaire qu'elle implique ne permettent pas une modélisation classique basée sur les SDDE. Les causes finales, qui sont essentiellement exclues de la physique, sont considérées par Stewart comme déterminantes.

propres objectifs. Dans le même temps, plus les autres sont dépendants de lui et plus son pouvoir sur eux s'étend.

Ces contraintes du niveau social sur l'individu constituent un des principes fondamentaux des SMA. Le graphe de [Ferber, 1995] (voir Figure 3-5, page 64) décrit ces relations micro-macro dans les systèmes multi-agents. Il résume de façon claire et synthétique le paradigme multi-agent. Néanmoins, je lui reproche un seul défaut : le retour (feed-back) de l'organisation vers les agents s'exprime uniquement en termes de contraintes sociales. Or, les organisations et la société véhiculent d'autres valeurs comme les alertes, le langage, la culture, etc..., qui imprègnent tout individu. Ce sont dans ce cas des retours positifs du social sur l'agent. [Maturana & Varela, 1994] expliquent que "le système social humain amplifie la créativité individuelle de ses composants, dans la mesure où le système existe au service de ses composants".

Les auteurs nomment "couplage de troisième ordre", ces relations entre les individus et l'organisation⁶⁰. Ils classent alors les organisations selon un gradient d'autonomie de la façon suivante :

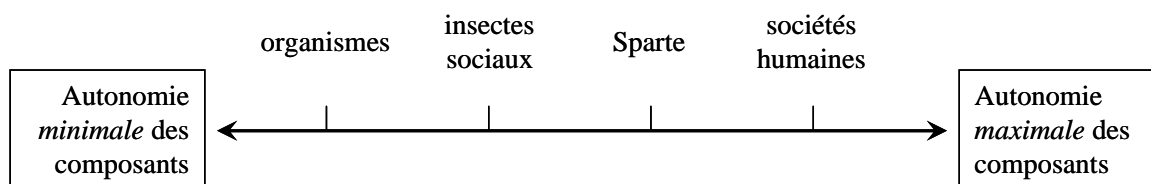


Figure 6-1 : Répartition des organisations selon un gradient d'autonomie, d'après [Maturana & Varela, 1994]

Ce degré d'autonomie maximum des humains reste cependant très relatif. En tant qu'êtres humains, nous sommes dépendants de notre environnement social dont la culture et le langage contribuent à forger notre identité.

"Nous autres êtres humains ne sommes des êtres humains que par le langage. Parce que nous avons le langage, il n'y a pas de limite à ce que nous pouvons écrire, imaginer, et raconter. Ainsi le langage imprègne toute notre ontogenèse d'individus : depuis la marche jusqu'à nos positions politiques. [...]"

"L'esprit n'est pas quelque chose qui se trouve à l'intérieur de mon cerveau. La conscience et l'esprit appartiennent au domaine du couplage social" [ibid.].

6.1.2 Autonomie informatique

La deuxième notion de l'autonomie est associée à un point de vue purement logiciel. Ici, l'autonomie doit garantir l'intégrité de l'agent pris dans le sens d'entité informatique. Pour Wooldridge [1999], un agent est un système informatique capable d'actions autonomes dans son environnement pour réaliser ses objectifs. En reconnaissant que l'autonomie est un concept flou ("autonomy is a somewhat tricky concept to tie down precisely"), il souligne qu'un agent doit être capable d'agir sans l'intervention humaine ni d'autre système. Il doit contrôler seul son état interne et ses comportements [Wooldridge et Jennings, 1995]. En dépassant les caractères standards attendus pour un agent (réactif, social et proactif), Wooldridge insiste sur la notion de contrôle de l'état interne qui doit rester inaccessible aux autres. L'agent prend ses décisions, seul, sans intervention extérieure.

⁶⁰ Le couplage de premier ordre correspond aux relations particulières qui lient les composants moléculaires à "l'unité autopoïétique cellulaire". Le couplage de deuxième ordre lie les cellules avec un organisme métacellulaire. Le couplage de troisième ordre associe l'individu et le collectif ; il coïncide avec l'émergence de second-ordre défini par [Gilbert, 1995].

An agent is a computer system that is capable of independent action on behalf of its user or owner (figuring out what needs to be done to satisfy design objectives, rather than constantly being told) [Wooldridge et Jennings, 1995]

L'intégrité interne [Gouaïch, 2003] de l'entité informatique, tant pour ses données que pour ses traitements, semble une condition nécessaire à son autonomie : "si cette structure est accédée ou modifiée par un autre agent, alors la propriété d'autonomie est perdue. [...] si l'intégrité interne d'un agent n'est pas respectée, il faut en conclure que l'agent n'est pas maître de son destin et qu'il n'est donc pas autonome" [Michel, 2004].

On peut alors se demander quelle différence il y a entre un agent et un objet. En effet, un objet informatique possède généralement une relative autonomie : un niveau de protection interdit aux autres objets d'aller lire et de modifier son état interne. Cette propriété, appelée *encapsulation*, permet de cacher l'information contenue dans un objet. C'est au développeur de rajouter des accesseurs, en lecture ou en écriture, pour rendre ses attributs accessibles aux autres. Sans cela, un objet extérieur ne peut pas modifier directement les données, ni mettre en péril les propriétés comportementales de l'objet⁶¹. L'ensemble de ces méthodes publiques constitue ce qui est communément appelé *l'interface* de l'objet⁶². Ainsi, la différence essentielle entre l'objet et le paradigme agent repose sur le rôle de cette interface. La pensée objet considère que l'interface constitue l'ensemble des *services* qu'un objet peut rendre. Or du point de vue de l'agent, ces services ne doivent entraver ni ses désirs ni ses intentions. Si l'objet doit répondre immédiatement à une demande de service, l'agent, lui, doit pouvoir choisir de la réaliser ou non.

*It cannot be for granted that an agent i will execute an action (method) a just because another agent j wants it to - a may not be in the best interests of i. We thus do not think of agents as invoking methods upon one-another, but rather as requesting actions to be performed. If j requests i to perform a, then i may perform the action or it may not. The locus of control with respect to the decision about whether to execute an action is thus different in agent and object systems. In the object-oriented case, the decision lies with the object that invokes the method. In the agent case, the decision lies with the agent that receives the request. This distinction between objects and agents has been nicely summarized in the following slogan: **Objects do it for free; agents do it for money** [Wooldridge, 1999].*

Sans forcément adhérer à l'aspect mercantile de cette proposition, on peut admettre que la différence entre un objet et un agent informatique repose sur la notion de service. Si le premier est voué à offrir ses services à quiconque et quelles que soient ses intentions, le second doit pouvoir choisir d'exécuter ou non une tâche demandée en fonction de ses objectifs et de son état du moment. Selon [Ferber, 2006], les langages orientés objets ont trahi la vision initiale de leurs concepteurs. Il considère que "les langages objets dont on dispose aujourd'hui ne sont que des pâles reflets des idées initiales qui avaient habitées les pionniers du domaine, à savoir Alan Kay avec Smalltalk et Carl Hewitt avec Plasma [Hewitt, 1977]". Les idées qui prévalaient pour ces concepteurs résidaient en une vision modulaire de programmes informatiques perçus comme des entités élémentaires, autonomes et communicantes par l'intermédiaire d'envois de messages⁶³. Pour Ferber, l'autonomie des objets "n'est pas assez importante".

⁶¹ En principe, l'encapsulation effective des langages orientés objet ne permet pas à deux instances d'une même classe d'accéder à leurs états respectifs. Cette propriété est utilisée en tant que telle dans SmallTalk par exemple. Mais d'autres langages tels que C++ ou Java autorisent l'instance d'une classe à un accès complet à l'état d'une autre instance de la même classe. Dans ce cas, une instance de la classe Humain par exemple, qui ne définit aucun accesseur, peut tout à fait modifier les attributs d'un autre agent qui de ce fait ne possède ni protection, ni autonomie !

⁶² L'interface d'un objet est un concept logiciel pour permettre la modularité et la réutilisation de code. A ne pas confondre avec l'interface utilisateur, l'interface graphique ou la classe Interface.

⁶³ La programmation orientée composants (POC) cherche aussi à aborder la modularité au niveau de l'architecture des logiciels, pour assurer une meilleure lisibilité et une meilleure maintenance et pour fournir des briques réutilisables. Basée sur les langages objet, cette approche n'est pas sans similitudes avec le paradigme agent.

Pour résumer, on distingue deux formes d'autonomie dans les SMA : l'une est censée émuler l'autonomie sociale et le degré d'indépendance d'un être vivant; l'autre cherche à encapsuler un agent dans des systèmes de protection qui garantissent son intégrité informatique. Dans la suite de cet exposé, nous utiliserons le terme *autonomie faible (ou émulée)* pour caractériser l'aspect simulé de l'autonomie, et le terme *autonomie forte* pour indiquer l'aspect logiciel de l'autonomie, chère aux partisans de l'intégrité informatique. Dans le cadre qui nous intéresse, ce chapitre porte essentiellement sur ce deuxième aspect.

6.2 AUTONOMIE FORTE : PROTEGER L'INTEGRITE INFORMATIQUE DE L'AGENT

Un agent simulé peut-il être autonome ? A priori, les entités informatiques des modèles multi-agents semblent jusqu'à présent peu autonomes. C'est la raison pour laquelle, [Drogoul et al., 2002] s'interrogent pour savoir s'il y a effectivement "un agent dans la simulation ?", car la majorité des SMA ne présentent pas ces caractéristiques :

"As far as we know, [Agents] cannot be found, yet, in any of the operational models presented so far in the conferences dedicated to MABS. Instead of using agent oriented languages, people tend to use either object-oriented or logical, procedural or functional languages to implement the specifications described in the conceptual agents. This means that the resulting "computational agents" (if we can still call them this way) do not possess any of the properties generally assigned to the agents used in MAS or DAI : they do not have any structural nor decisional autonomy, are not proactive, and cannot, for instance, modify their knowledge and behaviors through learning or adaptation." [ibid.]

Néanmoins, regardons de plus près les critiques faites à l'encontre des agents-objets par les partisans de l'intégrité informatique et leurs propositions pour des agents véritablement autonomes.

6.2.1 Action de l'agent : manipulation directe de l'environnement

[Michel, 2004] note que les modèles multi-agents utilisent tous fondamentalement la même modalité de l'action : pour agir sur l'environnement, les agents procèdent par modification directe ou indirecte de ses variables. Trop souvent, l'action d'un agent engendre des résultats directs sur l'objet manipulé. Comme le souligne Ferber, ces modalités classiques de l'action confondent ce qui est décidé par les agents avec ce qui se produit effectivement : "Elles mélangent le geste et le résultat du geste". Or le résultat d'une action n'est pas uniquement lié à l'entité agissante [Magnin, 1996]. Certaines actions conduisent à des situations conflictuelles, comme par exemple, le cas de deux agents souhaitant simultanément modifier une même variable de l'environnement.

Quelle que soit la technique utilisée (par "pas de temps" ou par événements), les modalités classiques de l'action peuvent conduire à des interactions biaisées. Pour Michel, "au-delà du problème de la modélisation de l'écoulement du temps, la véritable question qui se pose est celle de la représentation des actions simultanées, donc de l'interaction". D'après lui, ce problème nécessite le développement d'une théorie de l'action telle que le modèle «influences/réaction», pour permettre de décrire des comportements simultanés.

6.2.2 Principe "Influences–Réaction" : séparer le geste et le résultat du geste

6.2.2.1 Présentation du conflit

Comme [Müller, 2002] le souligne, "dans la notion d'interaction, il y a la notion d'action réciproque". Or, considérer l'action comme un changement d'état direct, pose des problèmes vis-à-vis de la réciprocité : il est difficile de voir le résultat de deux changements d'état simultanés sur une même variable. A partir de ces questions qui relèvent autant de l'action que de la simultanéité, [Ferber & Müller, 1996] proposent un modèle de l'action basé sur le principe « influences –

réaction ». L'idée générale repose sur la distinction de ce que veut faire un agent et de ce qui se passera effectivement. L'exemple sur lequel ils s'appuient, montre l'action simultanée de deux robots souhaitant pousser une porte battante.

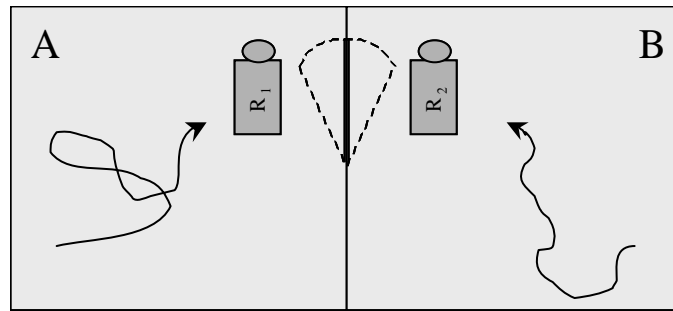


Figure 6-2 : Exemple de conflit formalisé par le modèle "influences – réaction" : deux robots ne se voyant pas souhaitent pousser simultanément une porte battante.

Dans des circonstances réelles, on imagine bien que cette situation débouche sur un conflit : soumise à des poussées contraires, la porte ne s'ouvre pas. Mais dans le cas d'une simulation standard par "pas de temps", il y a de fortes chances que le conflit n'apparaisse pas, chaque agent poussant la porte à tour de rôle.

6.2.2.2 Résolution simple du conflit

Avant de présenter les solutions proposées par les partisans de l'autonomie forte, il me paraît important de souligner qu'il existe des solutions simples mais ad hoc pour traiter ce conflit. On peut par exemple, utiliser les techniques mises en œuvre pour les automates cellulaires. En ajoutant des variables tampons à chaque robot, on assure la cohérence de leur perception. Ils ne modifient alors pas directement l'état de la porte, mais inscrivent le résultat de leur action souhaitée dans leur tampon : "porte ouverte vers A" ou "porte ouverte vers B". Dans une deuxième phase (mise à jour), le concepteur doit imaginer une solution pour le cas où ces deux variables seraient contradictoires. Habituellement, les modules de résolution de conflits des actions concurrentes proposent une sélection aléatoire de l'action à effectuer : ils annihilent au hasard l'action de l'un au profit de l'autre. Ceci apporte un changement minime par rapport à une gestion standard : au final l'un des deux robots passe la porte et l'autre est arrêté. Non seulement le choix du "vainqueur" est aléatoire mais surtout cette solution reste éloignée de la situation réelle. On peut donc imaginer une résolution à peine plus sophistiquée qui annulerait toutes les actions contradictoires. Ainsi, on obtiendrait des résultats proches de la situation réelle où les deux robots resteraient bloqués de chaque côté de la porte.

Evidemment cette solution ne fonctionne que dans ce cas particulier. L'objectif du principe "Influences-Réaction" consiste à proposer un modèle générique pour traiter toute situation de ce type.

6.2.2.3 Résolution du conflit via l'environnement

Les auteurs proposent une autre façon de simuler une telle situation. Ils introduisent la notion d'influences émises par un agent. Celui-ci ne modifie pas directement l'environnement, mais tente plutôt de l'influer. La somme des influences produites par les agents au même instant est alors recueillie par l'environnement qui en calcule les conséquences. Seul l'environnement est capable de combiner ces influences et d'y réagir. Car, comme le note [Müller 2002], "nous n'ouvrons jamais une porte (un changement d'état) mais nous poussons la porte (une influence) qui, si la porte n'est pas fermée à clef et quelqu'un n'est pas en train de pousser de l'autre côté peut résulter en l'ouverture de la porte (le changement d'état)". En effet, toute action peut être contrariée (décisions concurrentes comme dans le cas présent où deux robots tentent des opérations opposées) ou peut aboutir à un résultat imprévu (décisions influentes aboutissant par exemple à une collision lors de la traversée d'un carrefour par deux véhicules).

Comme présenté sur la figure suivante, ce modèle d'interaction se déroule en deux phases. La première consiste à collecter les différentes influences. La deuxième calcule la réaction éventuelle de l'environnement en fonction des "lois de l'univers" :

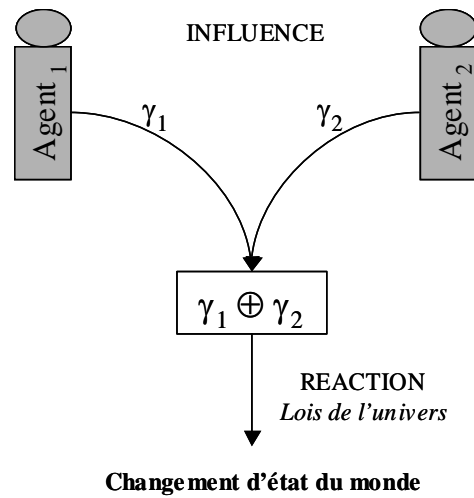


Figure 6-3 : Les deux phases du principe Influences – Réactions. Les influences émises par les agents sont agrégées par l'environnement qui calcule sa réaction en fonction de règles appelées "lois de l'univers".

En reprenant la formalisation algébrique proposée par [Genesereth & Nilsson, 1987], Michel décrit l'évolution du système de la façon suivante :

- *Evolution* = *Reaction* o *Influence* (influence puis réaction), avec :
- Evolution: $\Delta \rightarrow \Delta$, avec $\Delta = \langle \Sigma \times \Gamma \rangle$ où Σ est l'ensemble des états possibles du monde et où Γ est l'ensemble des influences,
- Influence: $\Sigma \times \Gamma \rightarrow \Gamma'$ et
- Reaction: $\Sigma \times \Gamma' \rightarrow \Sigma' \times \Gamma$

Le nouvel état σ du monde s'écrit alors de la façon suivante :

$$\sigma(t+dt) = \text{Reaction} \left(\left(\bigcup_i \gamma_i(t), \sigma(t) \right) \right)$$

Evidemment, la loi \oplus n'est pas toujours simple à spécifier ! On peut penser que la définition des lois de l'univers ne sera pas toujours évidente et que le calcul pourra poser des problèmes liés à sa complexité. Selon J.P. Müller, ce modèle souffre de certaines limitations :

- *Le modèle réalisé jusqu'ici est synchrone et nous aimerions migrer vers une prise en compte asynchrone de la dynamique du système. Cette extension soulève des problématiques importantes comme le problème du temps qu'il est important de résoudre de façon à comprendre la dynamique globale du système.*
- *L'environnement est globalement représenté, signifiant que nous devons calculer quel agent reçoit quelle influence étant donnée une représentation a priori de l'espace. Nous aimerions renverser la perspective en ayant les agents près les uns des autres parce qu'ils s'influencent et non pas qu'ils soient influencés parce qu'ils sont près l'un de l'autre. Cela signifie que la notion d'influence porte à la fois une signification dynamique et topologique. [Müller 2002]*

6.2.2.4 Application : le modèle Packet-World

Le principe "Influences – Réactions" a été mis en œuvre dans l'application Packet-World présentée dans le chapitre suivant, où des agents doivent coopérer pour transporter des paquets plus ou moins encombrants. Bien qu'elle intègre les deux phases d'influences et de réaction, la structure de l'ordonnanceur s'avère bien plus compliquée lorsqu'il s'agit d'offrir toutes les interactions,

notamment les interactions de coopération (voir chapitre suivant). Le graphique ci-dessous montre une vue synthétique de cette architecture :

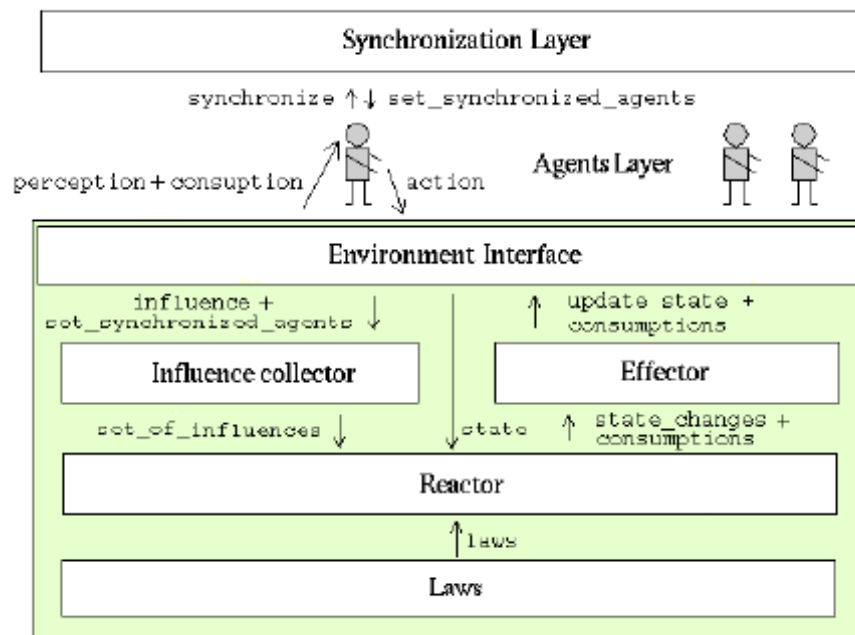


Figure 6-4 : Structure de l'ordonnanceur du modèle Packet-World, où l'on reconnaît les modules Influence et Réaction, d'après [Weyns & Holvoet, 2003b].

Dans [Weyns & Holvoet, 2003b], les auteurs testent ce modèle selon une gestion synchrone ou asynchrone. Ils reconnaissent que l'implémentation d'une collaboration synchrone est complexe car elle nécessite des supports particuliers. Ainsi, cette approche reste difficilement exploitable et formaliser des actions dans un tel cadre s'avère particulièrement compliqué surtout si les entités sont complexes. D'ailleurs, "le besoin de simuler provient souvent de cette difficulté à formaliser, voire même à analyser correctement l'influence de comportements complexes" [Meurisse, 2004].

6.2.3 Principe "Influences–Réaction" renforcé : séparer le corps et l'esprit

6.2.3.1 Première séparation

Comme nous venons de le voir, la décision d'exécuter une tâche n'aboutit pas systématiquement à sa réalisation. Michel considère alors que "les agents ne doivent pas avoir de contrôle sur les conséquences de leurs actes. Seul l'environnement est habilité à les calculer". Sur cette idée, il propose une première subdivision de l'agent en deux parties : l'une qui participe aux échanges avec l'environnement, et l'autre capable de délibérer.

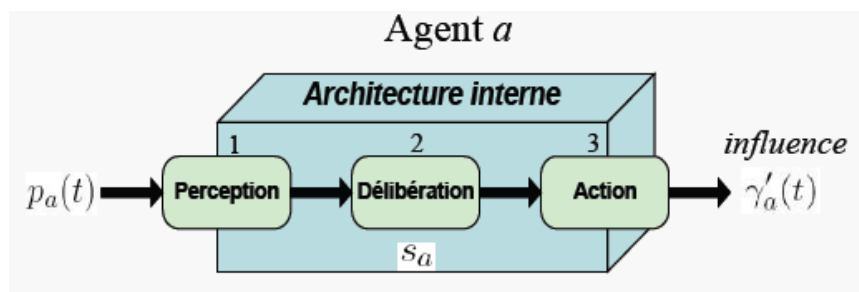


Figure 6-5 : Construction de la perception d'un agent par l'environnement, d'après [Michel, 2004].

Ce principe de séparation n'est bien sûr pas récent. Déjà, l'architecture de subsomption⁶⁴ proposée par Brooks dans [Brooks & Connell, 1986] et couramment utilisée, est conçue sur cette séparation. Dans la même optique, [Magnin, 1996] divise un agent en deux parties: son cerveau, centre de délibération et son corps, composante physique capable de percevoir et d'agir dans l'environnement. [Soulié, 2001] distingue aussi le système conatif de l'agent et les variables environnementales en formalisant ce qu'il appelle un lien bidirectionnel pour la perception et l'action.

Ce mécanisme est aussi à l'œuvre dans une extension du modèle AGR appelée AGRE (Agent Groupe Rôle Environnement) [Ferber et al., 2004]. En plus des rôles sociaux attribués à l'agent, AGRE ajoute un corps physique pour le situer dans un environnement. L'agent devient une entité abstraite qui possède un certain nombre de représentants (ou interfaces, appelées *modes*) qui le matérialisent dans des espaces sociaux ou physiques. "Il existe deux types de modes : les modes physiques que l'on appelle *corps* et les modes sociaux que l'on nomme *rôle* pour être cohérent avec AGR. Les rôles sont les manières sociales d'agir dans un groupe, alors que les corps sont les manières physiques d'agir dans une zone, c'est-à-dire une partie d'environnement" [Ferber, 2006].

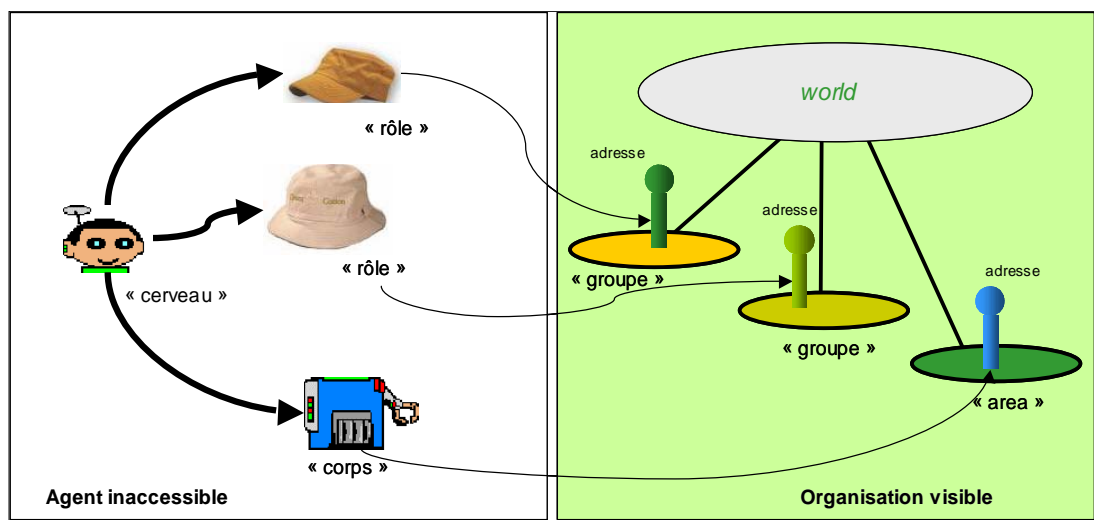


Figure 6-6 : Architecture de AGRE. Un agent regroupe plusieurs objets : une entité abstraite (cerveau ou AbstractAgent en Madkit) et des interfaces (ou modes) qui représentent l'agent dans un espace : les rôles sont des modes sociaux rattachés à des groupes et les corps sont des modes physiques positionnés sur une zone. L'agent, c'est-à-dire son cerveau et ses modes, est inaccessible aux autres agents (à l'exception de l'environnement). Les agents ne peuvent interagir que par envoi de messages.

L'agent n'existe donc qu'au travers de ses modes immergés dans des mondes sociaux et physiques. De plus, il n'a pas accès aux autres directement : lorsqu'il demande au système quels sont les agents jouant tel rôle dans tel groupe, il lui est retourné une liste d'adresses qui sont les boîtes à lettre des agents. Il n'obtient donc jamais une référence directe sur l'agent avec lequel il interagit. Il ne peut que lui envoyer des messages que le destinataire traitera à un moment de son choix. Ce mécanisme renforce l'autonomie des agents.

Pour entrer dans un espace (area), un agent doit s'enregistrer au monde physique qui lui retourne une référence sur son corps :

```
Body b = p.requestBody(AreaName, BodyType, Location, a);
```

L'agent peut alors demander à son corps *b* de se déplacer :

```
b.move(30,10);
```

⁶⁴ Dans l'architecture de subsomption, l'agent prend ses décisions en sélectionnant des modules qui représentent les tâches et qui sont classés par ordre de priorité. Cette pile de modules s'insère entre un composant de perception et un composant d'exécution.

Dans cet exemple, donné par [Ferber et al., 2004], on remarque que le cerveau peut manipuler son corps qui modifie directement l'environnement. Ici, le principe "influences-réaction" n'est pas appliqué.

6.2.3.2 Séparation accentuée : mon corps appartient à l'environnement !

Dans l'architecture proposée par Michel, l'agent ou plutôt son cerveau est davantage séparé de l'extérieur : il perçoit son milieu en lui envoyant, via son mode, des demandes de perception auxquelles l'environnement répond par envoi de messages. Ce procédé qui s'inscrit dans la droite ligne de la pensée représentationniste, empêche un accès direct aux entités du milieu⁶⁵. En retour, le corps de l'agent émet des influences vers l'environnement qui calcule alors les résultats de ces influences selon le principe "Influences-Réaction".

En poussant encore ce raisonnement, les seules variables sur lesquelles l'agent peut avoir un contrôle total sont celles qui sont liées à son système décisionnel. Pour les autres, en particulier, celles qui touchent à sa partie physique, Michel considère que l'agent ne doit avoir aucun pouvoir de modification. Finalement, cela revient à dire que l'agent ou plutôt la partie conative de l'agent est complètement dissociée de son corps qui devient un élément de l'environnement parmi les autres. Ainsi, pour avoir des informations sur son milieu, sur les autres agents et même sur l'état de son propre corps, le cerveau doit envoyer des messages à l'environnement. Par ailleurs, aucun agent ne peut directement modifier l'environnement, ni les autres agents, ni même ses propres variables : il envoie des influences à l'environnement qui appliquera lui-même les modifications qu'il aura calculées.

La séparation corps-cerveau ne s'inspire pas d'une volonté d'appliquer le dualisme corps-âme cher à la pensée cartésienne. Cette dichotomie provient plutôt de nécessités concrètes de renforcer l'autonomie forte des agents en appliquant et en renforçant le principe "Influences-Réaction". Elle découle naturellement de la mise en œuvre de ce principe. En distinguant les variables modifiables par le système décisionnel des variables sur lesquelles l'agent n'a aucun pouvoir de modification directe, c'est-à-dire ses attributs physiques et les variables d'état environnementales, elle renforce l'autonomie de tous.

6.2.3.3 Application : le projet Warbot

Warbot⁶⁶ est un jeu de simulation de robots en situation de compétition : deux équipes de robots virtuels s'affrontent, chacune cherchant à détruire la base de l'adversaire. Mais Warbot est un jeu particulier : c'est une plate-forme d'évaluation et d'analyse de techniques de coordination entre agents. Car dans ce projet, qui s'inspire de la RobotCup, les joueurs sont en fait les développeurs des agents. La particularité de Warbot vient de ce que les corps des robots ne peuvent pas être modifiés par les joueurs. Ils ne peuvent que développer les "cerveaux" de leurs robots. Les "corps" sont définis une fois pour toutes par les règles du jeu (qui intègrent les "lois de l'univers"). De ce fait, la compétition réside dans la qualité de la programmation de ces cerveaux et dans les stratégies de coordination proposées. L'objectif de recherche de Warbot est ainsi de concrétiser l'architecture corps/cerveau et influences/réaction présentée précédemment.

Le graphe suivant décrit par réseau de Pétri, le protocole d'exécution des agents mettant en œuvre le principe "Influences-Réaction" :

⁶⁵ Cette idée n'est pas récente; dans SimDelta, [Bousquet, 1994] considère l'espace (le biotope) comme le support des agents mais également comme un élément de contrôle des interactions agents – ressources. Ainsi, un agent pêcheur adresse une requête à l'espace pour connaître la position des poissons. Mais la pêche même est gérée par le biotope qui collecte les poissons et les distribue aux pêcheurs présents dans la zone de pêche.

⁶⁶ <http://www.warbot.org/>

- Des actions de détection. Par exemple, `getPercepts()` retourne l'ensemble des percepts issus des entités qui se trouvent dans le rayon de perception du robot.
- Des actions de communication (`readMessage()`, `send(AgentAdress agent, String act)`) qui spécifient les échanges de messages entre agents (donc entre 'Brains'). Leur contenu est une chaîne de caractères qui interdit ainsi de transférer une référence vers un objet.
- Des actions de commandes des armes telles `launchRocket()`, etc.

Pour mieux se rendre compte de ce qu'une telle modélisation implique, il faut comprendre que chaque action doit présenter un certain nombre de tests en contrepartie pour vérifier leur réalisation éventuelle. Par exemple, à chaque ordre de mouvement `move()`, le modélisateur doit ensuite s'interroger sur les résultats de cette action : `isMoving()` indique si l'agent s'est effectivement déplacé lors de l'action précédente ou s'il est bloqué par un obstacle.

L'expérience Warbot montre donc une nouvelle manière d'aborder la modélisation d'un SMA. Elle oblige à concevoir l'action non pas comme la modification directe d'un état mais comme une tentative incertaine d'influer sur l'environnement :

Ne pas avoir de certitude quant à la conséquence des actes d'un agent est une contrainte extrêmement intéressante qui concrétise un peu mieux certains aspects de la notion d'agent logiciel. [...] elle met en exergue le fait que la propriété d'autonomie d'un agent marque aussi son incapacité à maîtriser l'évolution de l'environnement dans lequel il se trouve. [Michel, 2004]

Michel avoue une certaine frustration pour ce qui concerne le traitement de la simultanéité. Les lois de l'univers qui rassemblent les influences et y réagissent, devrait être améliorées. Les déplacements des agents par exemple sont encore traités de façon séquentielle. Mais il reconnaît qu'un traitement plus sophistiqué aurait significativement compliqué le système. D'ailleurs, représenter des mouvements réalistes n'était pas l'objectif de Warbot.

6.2.4 Réification des interactions : le modèle MIC* {Mouvement Interaction Calcul}*

6.2.4.1 Présentation

Dans la continuité de ce travail, [Gouaïch & Guiraud, 2002], [Gouaïch, 2003] proposent un modèle algébrique formel où les notions d'autonomie et d'interaction sont placées au centre de la problématique.

Pour garantir l'autonomie d'un agent, [Gouaïch, 2003] propose de considérer l'intégrité interne comme critère objectif. L'intégrité interne est une contrainte de programmation qui conçoit un agent autonome comme un système dont les dynamiques internes et la structure ne sont ni observables, ni contrôlables directement par une autre entité. Les processus de décision de l'agent doivent être entièrement et seulement déterminés par ses perceptions et ses comportements. Pour Gouaïch, l'intégrité interne est la condition sine qua none de l'autonomie.

If the external observer of an entity has enough knowledge and means to control its behaviors, this entity is not autonomous for this observer. By contrast, if the external observer lacks knowledge and means to control the behaviors of the entity, the later is autonomous since its outputs may change in response to the same stimulus. So, no matter if the behaviors of the software entity are actually changing over time; it is the lack of knowledge and control means that makes the software entity behaving as autonomous [Gouaïch, 2005].

Mais la définition d'une frontière entre l'agent et l'extérieur avec lequel il doit interagir, est un problème délicat. Car l'agent doit modifier les perceptions des autres. La difficulté réside alors dans la possibilité d'interaction entre les agents sans interférer sur leur intégrité. Ce paradoxe force les auteurs à identifier une entité non-agent chargée de gérer ces interactions. C'est l'environnement de déploiement des agents appelé MIC*, pour Mouvement Interaction Calcul

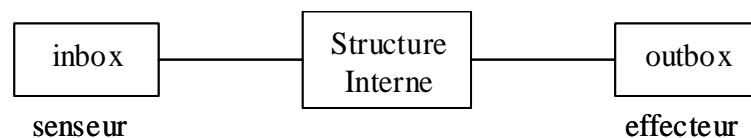
(l'astérisque signifie la répétition de ce processus sur N agents; le mouvement est une interaction particulière de l'agent avec son environnement et il est utilisé de façon récurrente dans les SMA).

Sans rentrer dans les détails du modèle, on peut néanmoins noter que la notion d'interaction est centrale. En cela, MIC* s'inscrit parfaitement dans la définition proposée par [Singh, 1996] d'une approche orientée interactions :

"We introduce interaction-oriented programming (IOP) as an approach to orchestrate the interactions among agents. IOP is more tractable and practical than general agent programming, especially in settings such as open information environments, where the internal details of autonomously developed agents are not available".

Dans MIC*, les interactions sont réifiées sous la forme "d'objets d'interaction" qui constituent le seul moyen par lequel les agents agissent dans l'environnement.

L'agent (processus de calcul) est organisé en trois composants : sa structure interne, sa boîte de réception (*inbox*) et sa boîte d'émission (*outbox*). Les boîtes *inbox* et *outbox* recouvrent les notions de senseurs et d'effecteurs. Symétriquement, elles constituent la seule partie observable d'un agent.



De plus, ces boîtes d'échanges ne peuvent contenir que des objets d'interaction. Un agent est ainsi une entité qui ne perçoit le monde qu'à travers des objets d'interaction depuis son *inbox*. Il effectue un calcul pour produire de nouveaux objets d'interaction dans son *outbox*. Celle-ci personnifie la présence de l'agent dans un "espace d'interaction". En effet, à l'instar de la notion de rôle qui incarne l'agent dans AGR, un agent MIC* existe uniquement dans un espace d'interaction à travers ses boîtes d'échange.

MIC* repose également sur la mise en œuvre du principe "Influences-Réaction". En effet, les objets d'interaction peuvent jouer le rôle des influences produites par les agents. La réaction de l'environnement à ces influences correspond alors à l'application de règles chargées d'organiser les différents objets d'interaction pour calculer une réaction.

6.2.4.2 Applications

MIC* est un modèle formel dont une implémentation a été réalisée par Michel sur la plate-forme Madkit. Le Jeu de la vie, imaginé par John Horton Conway en 1970 et Sugarscape [Epstein & Axtell, 1996] ont servi pour illustrer des utilisations de MIC* dont on trouve une description détaillée dans [Michel, 2004]. Mais revenons sur quelques points concernant l'implémentation de Sugarscape.

Trois espaces d'interaction sont définis : *World*, *Move* (espace des influences de mouvement) et *Repro* (espace des influences de reproduction). Deux types de processus de calcul sont présentés : un processus par agent (modélisation du cerveau) et un processus pour les dynamiques de l'environnement (évolution endogène et réactions aux influences). Deux modes de gestion du temps sont proposés : une gestion classique par horloge et une gestion événementielle telle que préconisée par [Lawson & Park, 2000].

Les simulations à "pas de temps" constants gèrent les activités des agents. En accord avec la description de [Lawson & Park, 2000], les agents effectuent deux comportements par "pas de temps". Les déplacements sont activés en premier dans un ordre aléatoire. Dans un deuxième temps, le comportement de reproduction des agents est activé puis la réaction à ces influences est calculée. Michel remarque lui-même "qu'il peut bien sûr exister une différence suivant l'ordre dans lequel les différentes étapes de la réaction sont considérées". Dans le cas d'une gestion par horloge, MIC* ne supprime donc pas le problème lié à l'ordre d'activation des agents.

En ce qui concerne la gestion événementielle, l'échéancier calcule la date de la prochaine activation d'un agent selon une loi de Poisson. Si statistiquement, les agents agissent tous uniformément, un agent donné peut aussi être activé plus souvent qu'un autre. D'autre part, une optimisation du simulateur était indispensable car sinon, les temps de calcul devenaient ingérables. Pour ce type de gestion, Michel souligne que "l'implémentation du mode événementiel recèle de nombreux pièges" et il admet que malgré l'attention portée à l'implémentation, il n'exclut pas de possibles erreurs.

La gestion des influences de mouvements consiste à recueillir les différentes influences $\gamma_{moves}(t)$ émises par les agents puis, après calcul, à modifier leur position. Si un conflit survient, c'est-à-dire si plusieurs agents souhaitent se déplacer sur une même cellule, "le traitement des influences de mouvement consiste à considérer les influences dans un ordre aléatoire". MIC* ne supprime donc pas les problèmes de conflit entre les agents. La solution proposée peut sembler proche d'une gestion classique par horloge avec mélange aléatoire des agents. Mais ici, la résolution de conflit entraîne une nouvelle règle : "dans le cas où un agent souhaite se déplacer sur une cellule qui se trouve occupée, l'environnement calcule la cellule non occupée la plus proche de l'objectif initial et y place l'agent. Dans le cas où cette cellule n'existerait pas, le mouvement de l'agent est annulé" [ibid.]. Une gestion synchrone de type automate cellulaire pourrait également proposer un module de gestion de conflit basée sur le même principe.

Pour conclure sur l'utilisation de MIC* dans le cadre des simulations multi-agents, Michel reconnaît les difficultés rencontrées pour mettre au point un simulateur de type Sugarscape:

le modèle que nous avons proposé est assez complexe du fait de l'application du principe Influence/Réaction, du modèle MIC et des différentes contraintes liées à la cohérence paradigmatique (distinction esprit/corps, intégrité environnementale, etc.). C'est pourquoi il conviendra de clarifier le plus possible les différents concepts qui sont manipulés lors d'une modélisation basée sur ces outils formels. La formalisation d'une loi d'interaction, d'une loi de computation et des différents objets d'interaction n'est pas forcément une tâche triviale en l'état.[ibid.]*

6.3 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre propose un tour d'horizon sur les concepts d'autonomie rencontrés dans les systèmes multi-agents. Après avoir décrit les niveaux conceptuels traitant de cette notion, deux voies se dégagent. L'une aborde l'autonomie réelle des êtres vivants (autonomie faible) que les agents devraient émuler. On constate d'ailleurs que les êtres vivants sont moins autonomes qu'il n'y paraît. Leurs décisions dépendent fortement de leur milieu, de leurs besoins physiologiques et du couplage social dans lequel ils sont engagés. L'autre voie s'attache à décrire l'autonomie informatique en cherchant à protéger l'intégrité même des entités (autonomie forte).

Les partisans de l'autonomie forte déplorent que la notion d'autonomie reste seulement théorique. Ils refusent de considérer l'action comme une modification directe de l'état de l'environnement et des autres agents. Alors ils distinguent le geste de sa conséquence.

Ce rejet conduit à une nouvelle forme de gestion des actions basée sur le principe "Influences-Réaction". Pour assurer davantage l'intégrité informatique, une architecture telle que AGR, qui place l'organisation comme élément fondamental d'un SMA, interdit toute référence directe à un agent. Celui-ci n'est visible que par ses interfaces qui le matérialisent dans des espaces sociaux et physiques. De plus, afin de renforcer encore l'autonomie forte, l'agent est divisé en deux parties : son cerveau en charge de la cognition et son corps. Cette division est d'ailleurs accentuée puisque le corps devient un élément de l'environnement parmi d'autres auquel personne n'a directement accès, pas même son propre cerveau. Pour Michel, cette division corps/cerveau permet de respecter les "contraintes d'intégrité environnementale" :

Un agent n'est pas une entité en mesure de calculer les conséquences de ses actes. A ce titre, il est important qu'un agent ne soit pas en mesure de modifier directement les variables d'état de l'environnement. Autrement dit, les variables environnementales ne doivent pas être modifiées par les agents. C'est ce que nous avons appelé la contrainte d'intégrité environnementale.[Michel, 2004]

Finalement, ces concepts sont formalisés dans MIC* qui place l'interaction au cœur des modèles. Après la conception objet, après la pensée agent, MIC* peut être vu comme un nouveau paradigme de modélisation multi-interactionnelle, encore appelé IOP (interaction-oriented programming).

Toutes ces propositions pour protéger l'autonomie des agents obligent souvent à diviser artificiellement ces derniers en deux parties indépendantes. Elles conduisent à considérer le corps de l'agent comme une entité étrangère répondant à des influences du cerveau. Et au final, c'est l'environnement qui détermine l'action effectivement réalisée.

Pour autant, est-il nécessaire de passer par de tels artifices pour concevoir tout type de SMA ? A-t-on réellement besoin d'une autonomie forte pour spécifier un modèle multi-agent pour aider à la gestion des ressources renouvelables ? Certes, lorsque l'on cherche à transposer l'autonomie d'un être vivant sur un agent, il est nécessaire de prendre des précautions afin d'éviter certains artéfacts. Des exemples présentés dans cette deuxième partie montrent que la modification directe de l'état d'un agent conduit parfois à des aberrations en termes de comportement avec des conséquences sur les résultats de la simulation.

Néanmoins, il ne me paraît pas nécessaire de passer systématiquement par des architectures compliquées pour émuler cette autonomie. D'ailleurs celles qui sont proposées ne résolvent pas les conflits liés aux actions simultanées interdépendantes et aux interactions. Je ne suis donc pas partisan de ces solutions qui me semblent trop compliquées et contraignantes pour le modélisateur. En fonction de ses objectifs, celui-ci peut émuler l'autonomie de ses agents par une approche classique (c'est-à-dire simplement objet). Il est par contre indispensable qu'il ait conscience des biais que peuvent entraîner des modifications directes des variables, qu'il les anticipe et propose des solutions adéquates en fonction de la situation. Par exemple, dans le cas des deux robots poussant une porte, il peut traiter le conflit par une solution standard de type automate cellulaire (variable tampon et mise à jour différée). Dans l'exemple de l'achat de poisson dans Mopa (chapitre précédent), il faut simplement que l'agent passif de la transaction (le pêcheur) mette à jour son état et fasse lui aussi le bilan de cette vente afin de rectifier le fonctionnement asymétrique de la transaction. Après un traitement standard de ce type, il est nécessaire d'en tester la robustesse en vérifiant les conséquences sur le comportement des agents et sur les simulations.

Dans le cadre de la modélisation des ressources renouvelables, il ne me paraît donc pas opportun d'abandonner les approches maintenant classiques des SMA pour adopter des outils sophistiqués et contraignants pour protéger l'intégrité informatique des agents. Il est par contre nécessaire d'aborder la modélisation des interactions avec attention. Ces questions font l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 7

GESTION DES INTERACTIONS APPLIQUEE AUX MODELES DES RESSOURCES RENOUVELABLES

En suivant les recommandations des tenants de l'autonomie forte, nous serions tentés d'abandonner les approches standards de la modélisation multi-agent. Mais pour la gestion des ressources renouvelables, a-t-on besoin d'agents réellement autonomes ? Quelles sont les biais qu'un traitement classique des interactions peut provoquer ? Peut-on les éviter autrement qu'en changeant de paradigme et en utilisant un principe "Influences-Réaction" voire une formalisation MIC* ? Ce chapitre récapitule les idées présentées dans les deux chapitres précédents, sur la gestion du temps et l'autonomie. Il présente mes conclusions en ce qui concerne la prise en compte de l'autonomie, le traitement des interactions et la gestion du temps.

7.1 QUELLES INTERACTIONS ?

7.1.1 Actions simultanées

La gestion de la simultanéité des actions s'avère être un problème de gestion des interactions. Si les modes de gestion du temps, parallèles ou séquentielles importent peu pour des actions simultanées indépendantes, les actions simultanées dépendantes demandent, elles, des choix explicites du modélisateur.

A partir des travaux de [Allen & G. Ferguson, 1994], [Boutilier & Brafman, 2001] et [Griffiths et al., 2002], Weyns et Holvoet [2003b] proposent une classification des actions simultanées, présentée sur le graphe suivant :

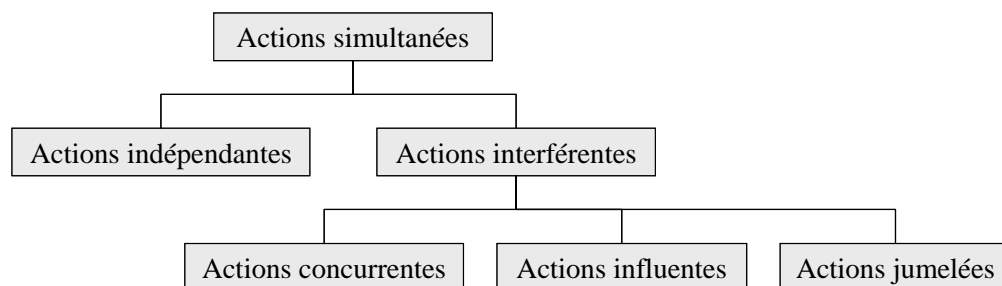


Figure 7-1 : Classification des actions simultanées. Traduction d'après [Weyns & Holvoet, 2003].

Les auteurs classent les actions simultanées dépendantes ou interférentes (*Interfering Actions*) en trois sous types :

- Les actions concurrentes (*Concurrent Actions*) sont de nature conflictuelle. Le résultat s'avère non déterministe : un des agents impliqués exécute finalement son action au détriment des autres qui voient leurs actions annihilées.
- Les actions influentes (*Influencing Actions*) se combinent mutuellement de façon à composer des effets positifs ou négatifs selon les cas.
- Les actions jumelées (*Joint Actions*) ont lieu pour des groupes d'agents qui agissent ensemble de façon coordonnée pour résoudre des problèmes insolubles pour des agents pris seuls à seuls.

Pour illustrer des exemples de ces différentes actions, les auteurs utilisent une application abstraite appelée Packet-World (<https://sourceforge.net/projects/packet-world/>) dont j'ai présenté l'architecture de type "influences-réaction" au chapitre précédent. Packet-World simule la coordination entre agents devant coopérer pour transporter des paquets encombrants. La figure suivante montre une vue de cette application :

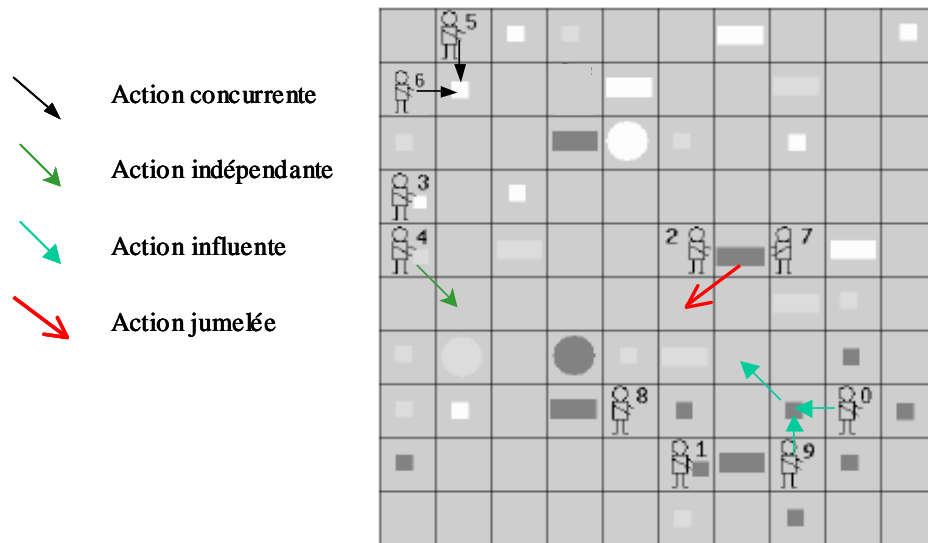


Figure 7-2 : Une réalisation du modèle Packet-World sur une grille de 10 sur 10 cases sur laquelle 10 agents tentent de rapporter des paquets plus ou moins encombrants (carrés et rectangles) aux bases (les cercles gris et blancs).

Percevant son voisinage proche, dans un rayon de deux cellules, un agent peut se déplacer sur une case libre, voisine de la sienne par "pas de temps". S'il n'est pas déjà chargé, il peut prendre un paquet qu'il rencontre ou bien le pousser. Dans le cas contraire, il peut poser son chargement de préférence sur une case destination. Outre ces actions dans l'environnement, il peut échanger des messages avec d'autres agents pour établir des collaborations. La figure précédente permet alors d'illustrer les différents types d'interactions présentées ci-dessus.

L'agent 4 qui porte seul un paquet vers une base (cercle blanc), exécute une action indépendante. Les agents 5 et 6 veulent prendre le même petit paquet simultanément. Ils sont en concurrence. Seul l'un des deux prendra finalement cet objet. Les agents 0 et 9 poussent le même paquet : soumis à deux actions influentes, celui-ci subit une force égale à la somme des deux poussées. Dans cet exemple, il glisse vers le Nord-Ouest, en direction de la base, mais si les deux agents avaient été en positions opposées, les deux forces se seraient annulées. Enfin, les agents 2 et 7 se coordonnent pour porter un paquet trop encombrant pour un seul agent. Leurs actions jumelées doivent se poursuivre jusqu'au dépôt de l'objet.

7.1.2 Interactions Co-X

En cherchant à expliciter "ce que les agents font ensemble", [Parunak et al. , 2003] proposent également une taxonomie des interactions parmi les SMA. Sur cette question, ils distinguent les comportements des agents en *cohérents*, *collaboratifs*, *coopératifs*, *compétitifs* ou *coordonnés* (tous ces comportements sont de type "Co-X" écrivent-ils). Ils étudient en particulier la notion de *corrélation* entre agents qui exprime des informations mutuelles (behavioral joint information). Ils calculent cette dépendance selon l'indice de Shannon. La différence I des entropies individuelles avec l'entropie globale du SMA mesure alors cette corrélation des comportements des agents. Plus I est élevé et plus les comportements des agents sont statistiquement dépendants les uns des autres. Une application de cette mesure est présentée à la fin de ce chapitre. D'autre part, ils concluent aussi que la coordination implique une architecture particulière entre agents quel que soit le type de communication choisie (centralisée ou peer-to-peer et directe ou indirecte via un médium).

7.1.3 Actes de langages

Mais dans la majorité des cas, les articles qui traitent des interactions font référence à l'aspect qualitatif des communications utilisées par les agents pour se coordonner et atteindre leurs buts. Une littérature abondante sur la coordination des SMA traite ainsi des actes de langage.

Pour la linguistique classique (Ferdinand de Saussure), l'étude du langage consistait à essayer de comprendre le sens des phrases. Les théoriciens de la sémantique du langage cherchaient à expliquer comment à partir d'une combinaison de mots il est possible de former un énoncé qui ait du sens. Pour cela, ils s'intéressaient essentiellement à savoir quel était le degré de vérité d'une narration, c'est à dire d'un énoncé qui affirme quelque chose du monde. Ils ne s'intéressaient donc qu'au rôle de transfert d'informations véhiculé par le langage et négligeaient les autres aspects de la communication. En particulier la fonction du langage qui traite de l'action sur le destinataire du message. Nul ne se posait véritablement la question de savoir si l'on pouvait faire des choses avec des mots.

La parution du livre d'Austin en 1962, "How to do things with words" (quand dire, c'est faire) modifia profondément la linguistique. En effet, Austin et Searle ont élaboré une théorie générale de la parole comme action. Elle repose sur l'idée suivante : lorsque nous parlons, nous ne disons pas simplement quelque chose, un énoncé vrai ou faux d'ailleurs, mais par ce moyen, nous cherchons également à informer, inciter, demander ou convaincre notre interlocuteur. Un acte de langage est un moyen mis en œuvre par celui qui parle (le locuteur) pour agir sur son environnement par ses paroles. Un individu s'adresse à un autre dans l'idée plus ou moins consciente de transformer ses représentations et de modifier ses buts. La théorie des actes de langage cherche alors à saisir l'effet que l'acte produit sur les sentiments de l'autre. Par exemple, le fait de dire "maintenant vous allez rentrer chez vous" peut énerver, soulager, convaincre, etc. Si l'énoncé a de l'effet sur l'auditoire et que cet effet est prévu par le locuteur alors il aura accompli un acte. Au-delà de la compréhension de sa sémantique, l'identification de l'acte de langage conditionne largement l'interprétation du message délivré.

7.1.4 Protocoles d'interaction

Bien évidemment, les travaux sur les SMA n'en sont pas encore à ce stade d'interprétation (si toutefois ils pouvaient l'être un jour), mais nombreux sont ceux qui étudient la nature des messages qui doivent être échangés entre les agents pour que le système arrive dans un état désiré. Le problème est donc pris à l'envers. Les recherches sur ce sujet consistent en effet à intégrer les concepts issus de la théorie des actes de langages, non pas pour identifier et interpréter n'importe quel type de message a posteriori, mais pour caractériser a priori des protocoles d'échange et obtenir des communications minimales et efficaces. Le but est de produire des échanges finalisés pour que les agents négocient, coopèrent ou, au minimum, recherchent un accord. La caractéristique fondamentale pour assurer le succès de ces systèmes repose sur la définition d'un cadre normalisé d'interaction (ou plutôt d'échange). Car la gestion de conversations entre agents n'est techniquement pas facile à garantir. En effet, pour des agents autonomes, threadés ou distants⁶⁸, l'enchaînement des messages nécessite des règles pour faire en sorte de produire une "discussion" cohérente et suivre son déroulement au cours du temps. Plusieurs tentatives de normalisation de la communication inter-agents ont ainsi été effectuées au sein de la communauté

⁶⁸ Des techniques permettant à des programmes informatiques de s'échanger des informations existent déjà depuis quelques années comme RPC (Remote Procedure Call, le plus ancien protocole pour appeler des procédures à distance), RMI (Remote Method Invocation, mécanisme d'invocation de méthodes sur des objets Java distants) et CORBA (Common Object Resource Broker Architecture, proche de RMI et disponible pour de nombreux langages de programmation). Mais ces techniques permettent juste d'invoquer des méthodes distantes. Elles ne gèrent pas le suivi d'une discussion.

multi-agent ces dernières années. Les langages de communication entre agents (ACL, pour Agent Communication Languages) constituent donc un axe de recherche [Finin et al., 1994].

KQML (Knowledge Query and Manipulation Language), langage de communication de haut niveau, a été fondé dans le but de faciliter la coopération entre agents cognitifs. KQML repose sur un protocole pour l'échange d'information. Indépendant de la syntaxe de son contenu, un message KQML contient trois couches : contenu, communication et message⁶⁹ et définit l'ontologie⁷⁰ utilisée.

La FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) a pour objectif le développement des SMA. Elle spécifie des standards pour favoriser l'interopérabilité des applications, des services et des équipements informatiques basés sur le paradigme agent (*Physical* rappelle que les agents peuvent éventuellement être humains). En 1999, la FIPA a défini un ACL pour répondre principalement à une critique contre KQML : les actes qu'il définit (ses performatifs) sont trop nombreux, redondants et ils ne couvrent pas tout le champ des actes envisageables. L'ACL de la FIPA ressemble beaucoup à KQML, mais il comporte moins de performatifs. De plus, il est défini de façon moins ambiguë grâce à un langage sémantique formel (SL pour Semantic Language).

Le plus connu des protocoles mis au point s'appelle le réseau contractuel (CNP, pour Contract Net Protocol). Un client contacte des agences de voyage pour leur demander un billet. Si une agence peut fournir une bonne proposition, elle informe le client. Après récupération des offres, le client peut alors se retrouver avec plusieurs agences volontaires et peut choisir entre elles. L'agence finalement retenue peut alors engager une communication plus directe pour la mise en place du contrat. Ce protocole se résume donc en trois phases :

- Un (ou plusieurs) client émet un appel d'offre;
- Les fournisseurs envoient leurs propositions;
- Le client choisit une proposition. Un contrat est établi avec le fournisseur sélectionné.

Il s'agit d'un des premiers protocoles de communication de haut niveau pour la résolution de problèmes distribués. Il a été repris et adapté à de nombreuses applications. Initialement ce protocole a été appliqué à l'allocation de ressources ainsi qu'à des systèmes de surveillance distribuée tel le contrôle du trafic aérien. Il a été étendu en introduisant la gestion de l'incertitude qui réside dans tout processus de négociation et a été appliqué au commerce électronique.

Autre exemple : étude du raisonnement d'agents *argumentatifs*. Un agent argumentatif est un agent qui peut défendre ses croyances et intentions (dans le cadre d'un agent BDI) à l'aide de raisons et de justifications appelées arguments. [Amgoud et al., 2002]

Pour conclure, les ACL définissent un cadre normalisé d'interactions. Ils fournissent des protocoles dits d'interaction pour favoriser des échanges finalisés et permettre la coordination d'agents. Mais le niveau Interaction qui décrit la structure d'une conversation reste problématique. Car en considérant des agents partageant la même ontologie, il reste difficile d'avoir des garanties sur le

⁶⁹ La couche de *contenu* contient le contenu du message, c'est-à-dire la valeur de l'attribut *content*.

La couche de *communication* contient les informations de routage qui permettent l'acheminement du message, par exemple les valeurs des attributs *sender* et *receiver*.

La couche de *message* est composée de la signature de l'acte de langage (l'intention, appelée performatif) et des valeurs des attributs qui décrivent le message, comme *language* ou *ontology*. Sa fonction est d'identifier l'acte du langage que l'expéditeur attache au contenu. Cet acte de langage indique par exemple si le message est une affirmation, une question, une commande ou un autre élément d'un ensemble de performatives connus. Ces dispositifs permettent une analyse des messages sans avoir à accéder au contenu. Les messages KQML sont donc enrichis d'une attitude sur le contenu : affirmation, désengagement, requête, question, etc. En pratique, un message est donc identifié grâce à son performatif.

⁷⁰ Une ontologie est une spécification qui définit le vocabulaire dans un domaine donné pour que les agents puissent se comprendre.

respect des protocoles d'échanges. C'est pourquoi des travaux ont été menés sur la formalisation de cet aspect interactionnel pour décrire l'enchaînement des messages, avoir certaines garanties sur le déroulement d'une conversation et faciliter l'interopérabilité entre plates-formes hétérogènes [Mathieu et al. 2003].

Toutefois les interactions présentées ici relèvent uniquement de l'aspect qualitatif des communications. Or les protocoles attachés à ces échanges sont encore peu utilisés pour la modélisation en biologie et des ressources renouvelables. Ce type d'interaction ne sera donc pas traité dans le cadre de cette thèse. Car les interactions qui ont été discutées dans les chapitres précédents concernent un tout autre niveau. Elles touchent à l'intégrité informatique des agents et, si elles sont insuffisamment formalisées leur mise en œuvre peut affecter les résultats des simulations.

7.2 INTERACTION FORTE – INTERACTION FAIBLE

Sans aborder les problèmes liés à la coordination d'agents, il semble nécessaire de distinguer plusieurs types d'interactions. Pour aborder cette distinction, nous décrirons les propositions de [Michel et al., 2003]. Ils proposent de discerner les interactions faibles des interactions fortes. Pour cela, ils proposent d'explorer deux modèles minimalistes qu'ils testent. Le premier présente le comportement de reproduction croisée d'agents pour décrire l'interaction forte. Il s'inspire d'un sous-modèle de Sugarscape dédié à la dynamique de la population des agents. Le deuxième modèle décrit deux agents consommant une ressource commune.

7.2.1 *Modèle de reproduction croisée : interaction forte*

Pour étudier les interactions directes entre agents, les auteurs se basent sur un modèle de dynamiques des populations telles qu'elles sont présentées dans Sugarscape. Pour rappel, une présentation succincte du modèle d'[Epstein & Axtell, 1997] est disponible à la note 43 (p. 94). Pour représenter "la croissance de ces sociétés artificielles", concentrons-nous uniquement sur la reproduction croisée entre les agents. Cette variation du modèle original est suffisante pour analyser l'interaction forte.

7.2.1.1 Modèle original

Epstein et Axtell modélisent la dynamique de la population en énonçant que tout agent en âge de procréer se reproduit avec un partenaire proche de lui, mature également et de sexe opposé. De plus, pour le succès de la reproduction, une place libre doit être disponible autour de l'un des deux agents. Pour ce modèle original, ils proposent donc l'algorithme suivant :

Reproduction :

```
Select a neighbor randomly
if the neighbor is fertile and of the opposite sex and at least
one of the agents has an empty neighboring site
then a child is born
repeat for all neighbors
```

Ce procédé semble simple et évident. Mais, la gestion par horloge ayant été choisie (cf. le diagramme de séquence de la figure 7-3 décrivant un "pas de temps"), on constate qu'un agent peut, dans certains cas, se reproduire plusieurs fois par "pas de temps". En effet, si les conditions de l'algorithme "*reproduction*" sont vérifiées pour deux agents voisins, chacun créera un nouveau-né lors de son activation. Le diagramme de séquence de la figure 7-4 montre un tel scénario. Ce phénomène de reproduction multiple ne semble a priori pas convenir dans le cadre de ce modèle qui vise à esquisser des sociétés plus ou moins humaines. Néanmoins, les auteurs expliquent que la

nécessité d'un seuil minimum de sucre pour se reproduire, diminue les risques de reproduction multiple.

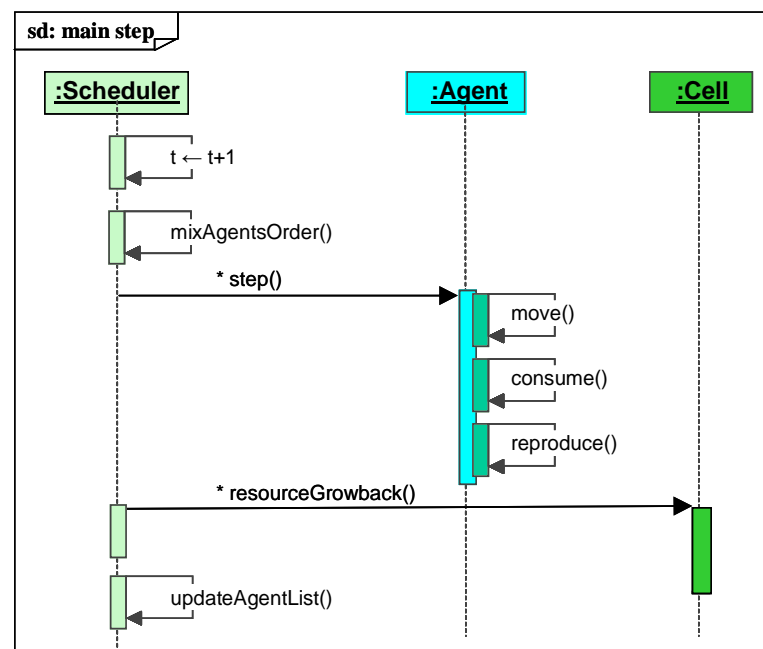


Figure 7-3 : Diagramme de séquence d'un pas de temps de Sugarscape.

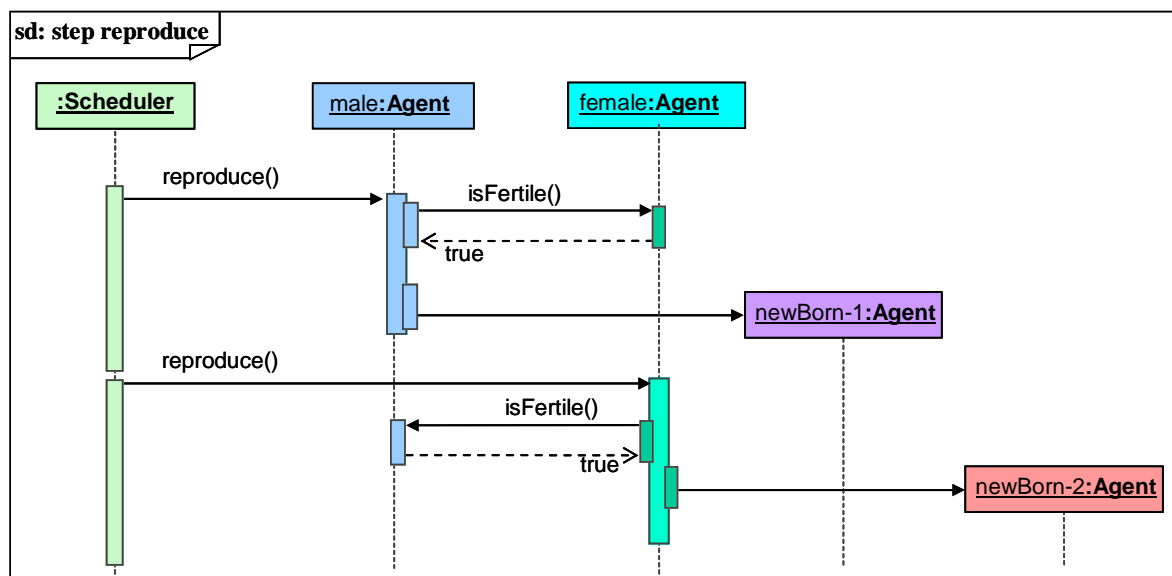


Figure 7-4 : Diagramme de séquence montrant le détail d'un scénario de double reproduction d'un couple d'agents fertiles : chaque agent, dans sa phase de reproduction avec son partenaire, crée un nouveau-né.

Deux remarques me semblent importantes ici :

Le fait de conserver les règles les plus simples peut engendrer des biais importants. La difficulté pour le modélisateur est de saisir intuitivement cette frontière entre des règles trop simples ou trop sophistiquées.

D'autre part, le fait de penser une interaction en se projetant dans le comportement d'un agent (algorithme "reproduction") peut entraîner au niveau du système, des phénomènes non souhaités. Lors de l'élaboration d'un modèle multi-agent, il faut donc s'imaginer à la place l'agent que l'on est en train de concevoir. Dans le même temps, le modélisateur doit aussi être capable d'anticiper les effets de ces comportements individuels au niveau global. Ce grand écart constitue une difficulté majeure.

7.2.1.2 Trois algorithmes de reproduction

De nombreuses adaptations de Sugarscape ont été réalisées. Certaines définissent de nouvelles règles pour obtenir différents réseaux d'agents ayant des comportements sociaux divers (on peut par exemple ajouter la règle selon laquelle les agents naissent avec les propriétés génétiques combinées de leurs parents). Mais plusieurs ré-implémentations de Sugarscape visent la réplication du modèle pour essayer de reproduire les résultats présentés dans le livre d'Epstein et Axtell. C'est le cas de [Lawson et Park, 2000] qui testent entre autre une gestion asynchrone du modèle. Ils étudient uniquement la dynamique démographique de la population à travers le renouvellement de la ressource, le mouvement des agents et leur reproduction. Ils concluent d'ailleurs que l'approche événementielle doit être privilégiée. Nous avons déjà vu (cf. chap. 5, page 127) pourquoi ces conclusions n'étaient pas exactes.

Afin d'éviter les phénomènes de reproduction multiple constatés dans le modèle original, Lawson et Park modifient l'algorithme de manière à le rendre "plus réaliste", en ajoutant une période de gestation :

"We have modified the agent reproduction rule to be more realistic, incorporating a gestation period... If a mate is found (i.e., there is at least one candidate agent), the female agent of the pair becomes pregnant. Throughout the gestation period, neither the male nor the female agent can move or attempt to reproduce.*

**Foot note: If the gestation period is $\eta = 0$, the behavior of agents under our reproduction rule is the same as if the gestation period was omitted from the rule" [Lawson & Park, 2000]*

Cette période de gestation empêche donc un agent de se reproduire plus d'une fois par "pas de temps".

En adoptant le principe "Influences-Réaction", [Michel et al., 2003] enrichissent eux-aussi le modèle initial : si les conditions de reproduction sont réunies pour deux agents, un nouveau-né sera effectivement produit *par* l'environnement, en réaction aux influences des deux agents. Ces influences ne sont pas des actions directes des agents comme décrit par l'algorithme d'Epstein et Axtell, mais elles expriment le *souhait* de chaque agent de vouloir se reproduire.

Pour étudier l'impact de différentes interactions de reproduction, [Michel et al., 2003] formalisent trois comportements simples de deux agents *A* et *B* de la façon suivante : Toutes les conditions de reproduction sont constamment réunies (agents matures, de sexe opposé, place disponible). Chacun possède une probabilité P_{repro} exprimant la volonté de se reproduire ou à l'inverse ($P_{\neg repro}$) de faire autre chose :

$P_{repro}(A) = a$	$P_{\neg repro}(A) = 1 - a$
$P_{repro}(B) = \beta$	$P_{\neg repro}(B) = 1 - \beta$

Ils présentent alors quatre situations d'interactions possibles en fonction des volontés de chacun :

Tableau 1 : Quatre situations d'interaction en fonction des volontés affichées par les agents *A* et *B*.

Situation 1	$P_{repro}(A) \cap P_{repro}(B) = \alpha.\beta$
Situation 2	$P_{repro}(A) \cap P_{\neg repro}(B) = \alpha - \alpha.\beta$
Situation 3	$P_{\neg repro}(A) \cap P_{repro}(B) = \beta - \alpha.\beta$
Situation 4	$P_{\neg repro}(A) \cap P_{\neg repro}(B) = 1 - \beta - \alpha + \alpha.\beta$

En appliquant les algorithmes des trois modèles sur ces tableaux de probabilités, ils trouvent trois séries de résultats différents.

Tableau 2 : Nombre de naissances en fonction de chaque situation d'interaction pour les trois modèles.

Volontés de se reproduire	Nombre de naissances			Probabilités
	Epstein&Axtell	Lawson&Park	Michel&al.	
Situation 1	2	1	1	$\alpha.\beta$
Situation 2	1	1	0	$\alpha - \alpha \beta$
Situation 3	1	1	0	$\beta - \alpha.\beta$
Situation 4	0	0	0	$1 - \beta - \alpha + \alpha.\beta$

7.2.1.3 Critique des résultats

L'ajout d'une période de gestation tel que préconisé par Lawson et Park et l'ajout d'un désir de se reproduire tel qu'imaginé par Michel et al., constituent des modifications du modèle conceptuel initial. Ces ajouts semblent peut-être indispensables pour s'approcher de la logique décrite par Epstein et Axtell qui cherchent à comprendre des phénomènes sociaux plus ou moins humains. Néanmoins, ces modifications du modèle conceptuel influencent évidemment les résultats des simulations. Il est donc délicat de considérer ces expériences comme des répliques du modèle original. Mais ce qui est plus problématique, c'est que ces modifications ne permettent pas de comparer des scénarios de gestion du temps et des interactions. Elles ont cependant l'avantage de révéler un point sensible du modèle Sugarscape.

Les résultats différents de ces trois modèles sont amplement discutés par [Michel, 2004] qui considère pratiquement comme un "viol", les interactions de reproduction appliquées dans les deux premiers modèles. Un malheur ne venant jamais seul, ces violations sont aggravées dans le cas du modèle original, lorsque l'autonomie d'un agent est ignorée plusieurs fois par "pas de temps" ! Pour Michel, seul le principe "Influences-Réaction" permet de garantir le respect de l'autonomie car un agent ne peut pas directement modifier l'état des autres agents ; au final, c'est l'environnement qui décide ou non de générer le nouvel agent et tout dépend de la façon dont le modélisateur à fixer les "lois de l'univers".

Mais on peut parvenir au même résultat en modifiant légèrement le modèle initial. Par exemple, rajouter une méthode du genre "*wantToReproduce()*", permettrait de savoir si un agent souhaite ou non se reproduire. L'algorithme initial deviendrait alors :

Reproduction :

```

Select a neighbor agent randomly
if the neighbor want to reproduce and of the opposite sex and at
least one of the agents has an empty neighbor site
then a child is born
repeat for all neighbors

```

En intégrant un appel à *isFertile()* comme condition élémentaire, la méthode *wantToReproduce()* permet de connaître l'état d'esprit du partenaire potentiel et protège ainsi son processus décisionnel. Ce procédé reste évidemment un artifice, mais son avantage est d'éviter un travail ardu. Car pour protéger l'intégrité informatique des agents, le principe "Influences-Réaction" réclame plus de réalisme de la part du concepteur et est plus difficile à mettre en œuvre.

Toutefois, cet artifice se situe dans la droite ligne de l'approche classique où le concept d'agent reste très proche du paradigme objet. Or bien des exemples dévoilent des biais liés à une approche purement objet de la simulation multi-agent. L'algorithme "*reproduction*" en est un parmi de nombreux autres. Les expériences récentes de répliques révèlent souvent ce type de problèmes. Elles favorisent donc la maturation du domaine de la modélisation multi-agent qui entre, espérons-

le, dans une ère plus consciente de ses faiblesses. Car maintenant, le modélisateur multi-agent doit être au courant de ce genre de biais. Il doit les anticiper pour les éviter.

7.2.2 Modèle de consommation d'une ressource commune : interaction faible

Pour étudier l'importance de la simultanéité et l'impact de sa prise en compte ou non dans les simulations, [Michel et al., 2003] analysent un autre modèle dans lequel les interactions entre agents sont indirectes. Dans le cadre de la gestion des ressources renouvelables, une description et une ré-implémentation de ce modèle me paraissent nécessaires. J'ai effectué ce travail et en présente les résultats ci-dessous.

7.2.2.1 Présentation du modèle

Deux agents *A* et *B* consomment une ressource commune qui se régénère régulièrement. La régénération suit une loi arithmétique linéairement : le niveau de la ressource (*level*) augmente d'une quantité (*growthIndex*) à chaque "pas de temps". Le sous-modèle s'écrit donc :

$$\text{level}_{t+1} = \text{level}_t + \text{growthIndex}$$

Cette ressource, en accès libre, est consommée par *A* et *B* qui en prélèvent chacun une quantité (*consumption*) variable selon leur besoin. Dans le modèle original, les agents brûlent leur énergie en fonction d'un taux catabolique (*cataRate*) qui varie aléatoirement entre 0 et 10. Si le niveau d'énergie (*energy*) d'un agent est supérieur à un seuil (*hungryThreshold*), il ne fait rien. Mais si l'agent a faim, il consomme, si possible, une quantité de la ressource jusqu'à atteindre un seuil de satiété (*satietyThreshold*).

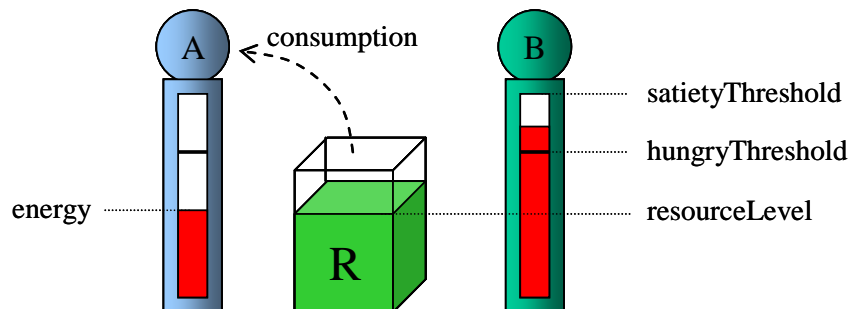


Figure 7-5 : Modèle-jouet de consommation d'une ressource commune, d'après [Michel, 2004].

Le diagramme de classe suivant décrit la structure du modèle :

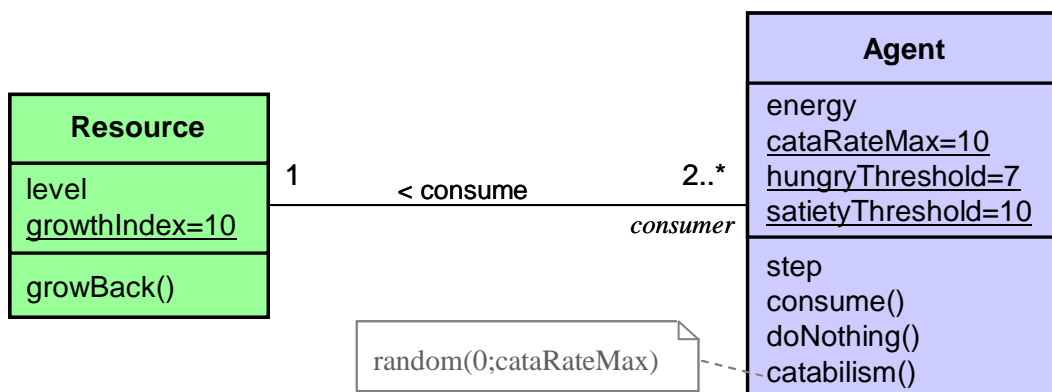


Figure 7-6 : Diagramme de classe (phase d'analyse) du modèle de consommation d'une ressource commune. Les valeurs assignées aux variables de classe sont les valeurs par défaut qui ont servi aux analyses qui suivent mais pour lesquelles seule la variable *growthIndex* sera modifiée

La consommation de la ressource est effectuée selon deux procédés :

Le scénario 1 correspond à une consommation séquentielle où chaque agent consomme directement la quantité voulue au moment de son activation. L'ordre d'activation des agents est mélangé aléatoirement à chaque "pas de temps".

Le scénario 2 obéit d'avantage au principe "Influences-Réaction" pour respecter une simultanéité des actions des agents sur la ressource. Chacun émet une influence de prélèvement et l'environnement y réagit en fournissant à chacun une quantité calculée selon la règle suivante : si le niveau de la ressource est suffisant pour répondre à la demande totale, chaque agent reçoit la quantité désirée. Si la demande totale est trop élevée, alors chacun reçoit une quantité proportionnelle à sa demande initiale.

Les détails de ce modèle sont présentés en annexe 2 (p. 291). Concrètement, pour le scénario 2, le simulateur que j'ai implémenté utilise une gestion synchrone de type automate cellulaire : chaque agent calcule ses besoins, puis dans un deuxième temps la ressource distribue à chacun une quantité proportionnelle à sa demande.

7.2.2.2 Résultats selon [Michel et al., 2003]

Evidemment, quand le taux de régénération est élevé, la ressource reste abondante et les deux agents ne souffrent d'aucune restriction. Dans ce cas, les résultats des simulations restent identiques pour les deux scénarios. Il est plus intéressant de tester le modèle pour des valeurs de régénération plus faibles car alors, l'accès à la ressource devient conflictuel.

En répétant un millier de simulations pour différents indices de croissance (*growthIndex*) et différents seuil de faim (*hungryThreshold*), [Michel et al., 2003] calculent le niveau d'énergie moyen de chaque agent. Lorsque la ressource est peu productive (*growthIndex* faible), les auteurs sont surpris de constater que les énergies moyennes sont similaires pour les deux agents, quel que soit le scénario envisagé.

"En fait nous nous attendions à trouver une bien meilleure espérance de vie dans le cas de l'application du principe "Influences-Réaction" étant donné le partage équitable qui est réalisé sur la ressource. Il n'en a rien été. Les résultats ont été rigoureusement équivalents dans les deux cas. Dans cet exemple, et contrairement à nos attentes, la prise en compte de la simultanéité n'a donc pas influencé les résultats". [Michel, 2004]

A partir de ces résultats, les auteurs concluent que pour ce type d'interactions indirectes, qu'ils appellent "interactions faibles", la gestion de la simultanéité n'est pas obligatoire et qu'une gestion standard par ordonnancement avec prélèvement directe sur l'environnement peut être appliquée. Contrairement aux interactions directes ("fortes") et "bien que ces actions puissent interférer entre elles, et quelle que soit la gestion des interactions, l'autonomie des agents n'est pas remise en cause par la technique utilisée". Pour ce type d'interaction, l'autonomie (prise au sens de l'intégrité du processus décisionnel) est toujours respectée.

Mais, est-ce véritablement un problème d'autonomie sur la prise de décision ? De nombreux cas d'exploitation de ressources limitées montrent pourtant que les modalités pour y accéder sont un problème sensible : les décisions des uns pouvant influencer celles des autres. En effet, avec la publication de la "tragédie des communs", [Hardin, 1968] démontre qu'une ressource commune exploitée par des agents rationnels est condamnée à disparaître, mettant en danger tous les utilisateurs⁷¹. Pour éviter sa surexploitation, Hardin préconise la privatisation ou une gestion centralisée de son accès. Or, il s'avère que la tragédie n'est pas liée au caractère commun des

⁷¹ Hardin explique comment l'utilisation de ces ressources communes conduit à une privatisation des profits et à une distribution des coûts pour tous. Rapidement, chacun cherche à augmenter ses gains en intensifiant ses prélèvements, ce qui entraîne une compétition pour ce bien commun menant inévitablement à sa surexploitation et finalement à sa disparition.

ressources mais plutôt à leur accès libre⁷². L'accès aux ressources s'avère un point très sensible pour leur gestion. Aussi, les conclusions tirées de l'article de [Michel et al., 2003] me paraissent étranges (bien qu'elles m'aient rassuré et conforté pour promouvoir une gestion simple du temps !). Pour en vérifier les résultats, j'ai donc, à partir des spécifications de l'article, ré-implémenté un simulateur (voir détails de la réplication en annexe 2, p. 291. Voir aussi le chap. réplication).

7.2.2.3 Résultats de la réplication

Les courbes de la figure suivantes montrent l'évolution temporelle du niveau de la ressource ainsi que le niveau d'énergie des deux agents et la consommation moyenne.

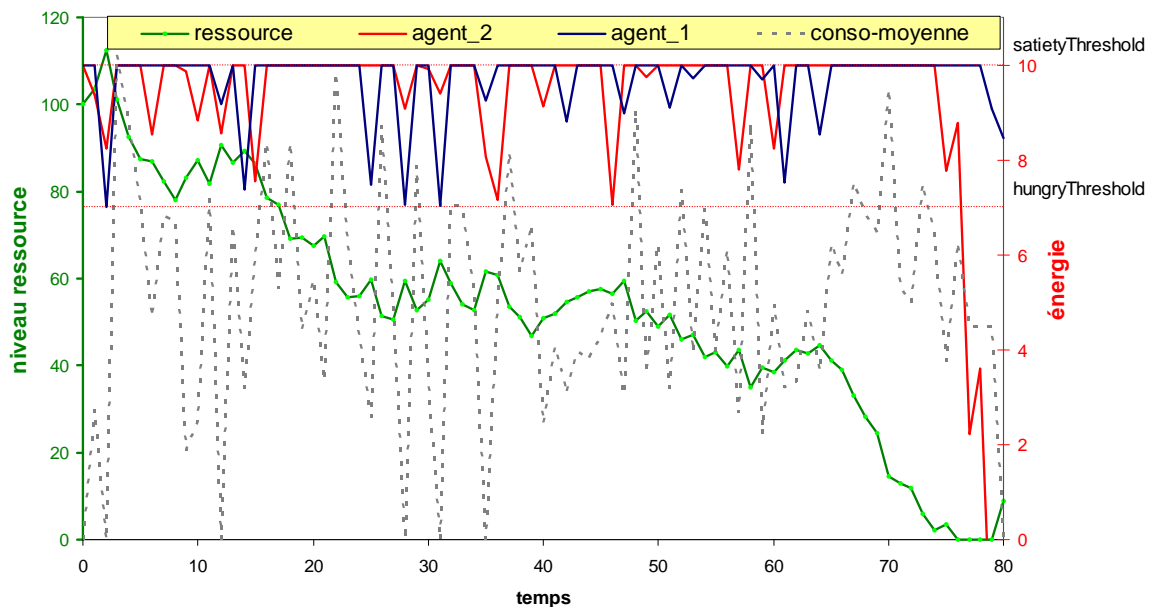


Figure 7-7 : Evolution d'une simulation (scénario 1) comprenant deux agents consommant une ressource. L'indice de croissance est fixé à 9, le seuil de satiété vaut 10 et le seuil de faim égale 7. Les niveaux d'énergie des agents étant relevés en fin de pas de temps, ils ne permettent pas de mesurer la consommation qui a donc été rajoutée au graphique.

Ce graphe montre une simulation particulière qui laisse perdurer la coexistence des deux agents pendant une période assez longue. Mais pour beaucoup d'autres simulations, cette coexistence est soit très brève, soit stabilisée. En fonction de la valeur de l'indice de croissance de la ressource (*growthIndex*), on distingue donc trois zones de comportement du modèle : une zone d'exclusion rapide, une zone de coexistence stable et une zone intermédiaire d'où provient la simulation présentée par le graphique ci-dessus.

L'énergie moyenne par agent comme critère pour analyser une sensibilité à l'indice de croissance ne me semble pas satisfaisant. En effet, en faisant varier cet indice de 0 à N, les moyennes globales obtenues pour l'énergie des agents sont écrasées. Je préfère d'autres indicateurs que j'étudie pour chaque valeur de *growthIndex*.

- Indicateur "durée avant première exclusion"

Sachant que le catabolisme des agents fluctue entre 0 et 10 unités d'énergie par "pas de temps", la consommation moyenne par agent est de 5 unités. Pour deux agents, on s'intéresse donc à des indices de croissance de la ressource inférieurs à 10. Au-delà de cette valeur, certaines simulations peuvent conserver indéfiniment les deux agents vivants. En deçà, au moins un agent est exclu. En effet, pour une ressource homogène, le principe de Gause se caractérise par une compétition qui

⁷² Il n'empêche que depuis cet article et parce que "la science" en avait démontré la nécessité, un mouvement de privatisation systématique s'est mis en place à la surface du globe... mais je m'égare, je m'égare...

entraîne souvent une exclusion d'un des utilisateurs. D'ailleurs, pour des indices de croissance inférieurs à 10, nous obtenons systématiquement une exclusion. Le temps écoulé avant exclusion d'un des agents nous sert alors d'indicateur pour départager les deux scénarios : des gestions différentes des interactions avec la ressource entraînent-elles des différences sur les temps d'exclusion ?

Les graphes présentés sur les figures suivantes, montrent les durées moyennes avant l'exclusion d'au moins un agent. Pour chaque valeur de l'indice de croissance, 1000 simulations de 3000 "pas de temps" sont répétées pour calculer une date d'exclusion moyenne.

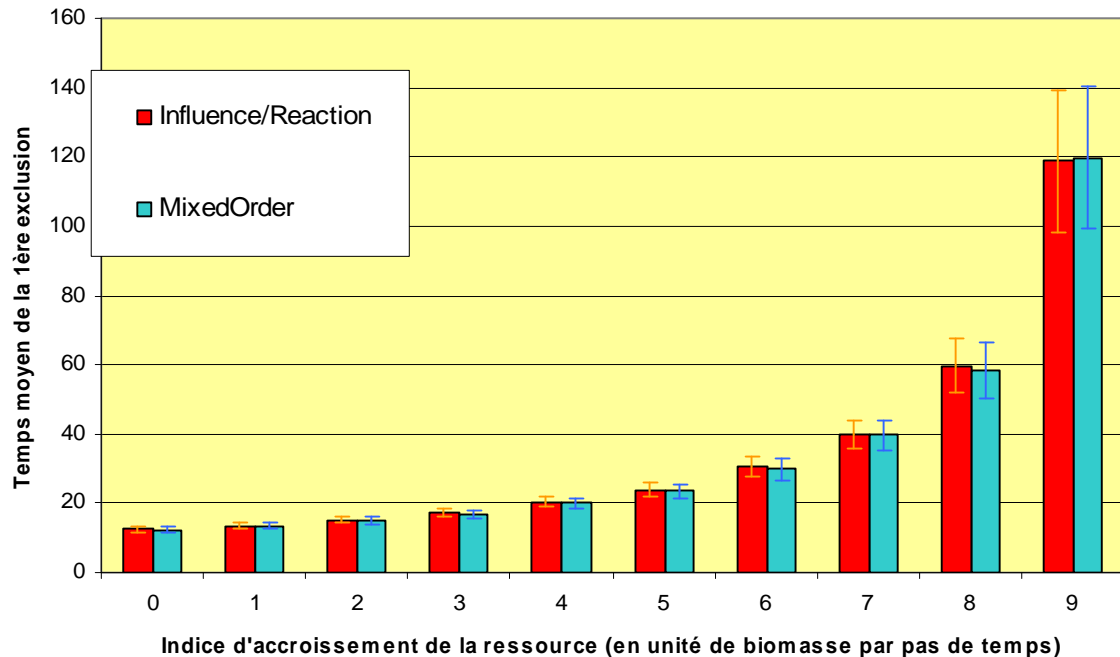


Figure 7-8 : Graphe comparatif des durées moyennes avant exclusion en fonction des indices de croissance de la ressource. La durée moyenne avant exclusion sert d'indicateur pour comparer deux scénarios de gestions des interactions : gestion standard par prélèvements directs par les agents (en bleu) et gestion selon le principe "Influences-Réaction" (en rouge). Chaque barre verticale représente le temps moyen avant exclusion. Les barres d'erreurs mesurent la valeur de l'écart-type pour chaque moyenne (c'est-à-dire l'étalement ou la dispersion par rapport à la moyenne).

Plus l'indice de régénération de la ressource augmente et plus l'exclusion d'un des agents est retardée. Les dispersions de ces durées augmentent également mais restent dans des proportions raisonnables. Pour des valeurs de régénération égales à 10, des cas de coviabilité apparaissent pendant de très longues périodes (au-delà de 3000 "pas de temps") pour les deux scénarios de gestion. Au-dessus de 10, la coexistence des agents semble être la règle.

Ce graphe confirme les résultats de [Michel et al., 2003] : les différences entre les deux scénarios sont minimales. On pourrait donc parvenir à la même conclusion.

- Ajout de scénarios et de plusieurs agents.

Pour analyser encore ce modèle, d'autres tests ont été menés :

- d'autres scénarios de type 1 (ordonnancement et prélèvements directs) ont été implémentés:
 - "fixedOrder" pour lequel aucun brassage aléatoire n'est effectué. Les agents agissent toujours dans le même ordre.
 - Le scénario du plus faible d'abord ("weakestFirst") trie les agents à chaque pas de temps, du plus faible (le moins d'énergie) au plus fort.

- Le scénario du plus fort d'abord ("strongestFirst") trie les agents à chaque pas de temps, du plus fort (le plus d'énergie) au plus faible.
- Des simulations avec plus de deux agents ont été testées. Bien sûr, plus les agents sont nombreux et plus la ressource est exploitée. Les scénarios ont donc été analysés pour des valeurs de l'indice d'accroissement allant jusqu'à $(N \times \text{cataMax}/2)$ (N étant le nombre d'agents). Le temps d'exclusion relevé correspond toujours à la première élimination d'un agent.

La figure suivante montre les résultats des quatre scénarios pour un système composé d'une seule ressource exploitée par 10 agents.

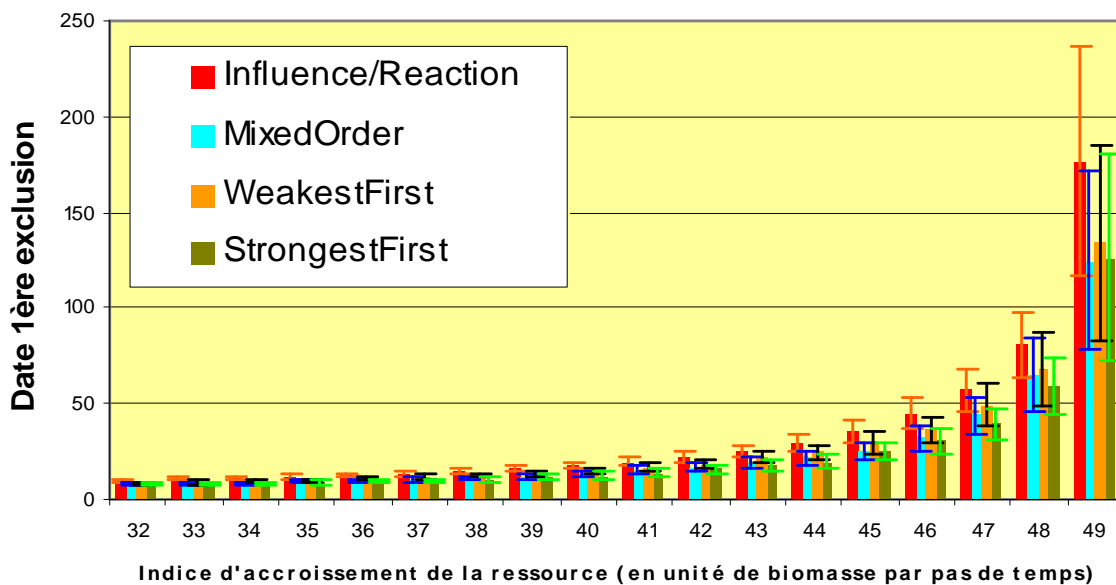


Figure 7-9 : Graphe comparatif des durées moyennes d'exclusion en fonction des indices de croissance de la ressource, pour des états initiaux composés de 10 agents. La durée moyenne avant exclusion sert d'indicateur pour comparer quatre scénarios de gestion des interactions : gestion selon le principe "Influences-Réaction" (en rouge), gestion standard par prélèvements directs par les agents (en bleu), gestion standard commençant par les agents les plus faibles (en orange) et gestion standard commençant par les plus forts (en vert).

Pour les faibles valeurs de *growthIndex* (le graphe ne présente pas les valeurs de 0 à 32 de la zone d'exclusion rapide), les temps moyens d'exclusion sont similaires. Mais dans la zone intermédiaire, plus *growthIndex* tend vers une valeur limite (=50) autorisant la coexistence des agents, plus des écarts entre scénarios apparaissent sur les durées d'exclusion. Les durées moyennes de coexistence des agents deviennent bien plus importantes pour le scénario 2 que pour les trois autres. Pour cette zone sensible, on peut donc dire que le choix de la gestion des interactions influence les sorties du modèle.

On observe également des différences entre les trois scénarios de gestion standard par prélèvement direct : le scénario "weakestFirst" possède des durées de cohabitation plus longue que le scénario opposé "strongestFirst". L'explication est simple : en se nourrissant les premiers, les agents les plus faibles parviennent à survivre plus longtemps.

- Indicateur "coexistence"

Le choix d'un indicateur pour comparer des scénarios est délicat. J'ai donc également testé la capacité de la ressource à nourrir une population d'agents. Ce nouvel indicateur, appelé "coexistence", indique le nombre d'agents pouvant cohabiter sur une longue période de temps en exploitant une même ressource. Concrètement, ce paramètre enregistre le nombre d'agents encore "en vie" à la fin d'une longue simulation de 3000 "pas de temps" à partir d'un état initial de 20 agents. Le graphe suivant présente cette capacité de coexistence en fonction de la régénération de la ressource.

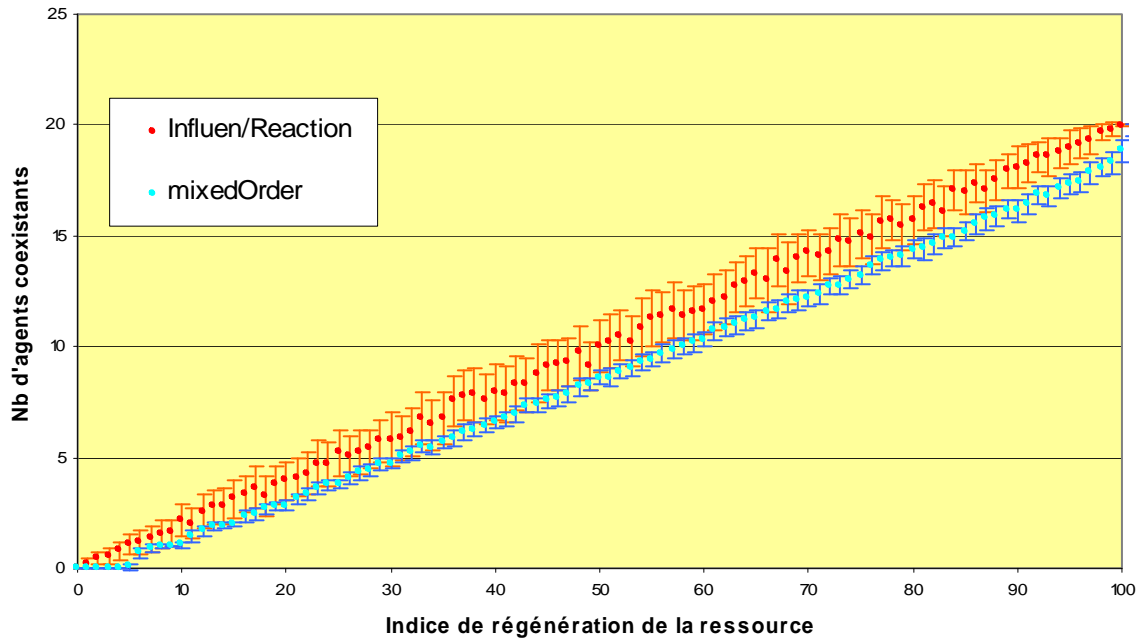


Figure 7-10 : Graphe comparatif du nombre d'agents coexistants en fonction de la régénération de la ressource. Seuls les scénarios 1 (gestion standard par prélèvements directs, en bleu) et 2 (gestion selon le principe "Influences-Réaction", en rouge) sont présentés. Chaque point représente la moyenne et l'écart-type de 100 simulations.

Ici encore on constate des différences importantes entre les deux scénarios. Le scénario "Influences-Réaction" autorise davantage de coexistence que le scénario standard. Par contre, sa dispersion pour chaque valeur de *growthIndex* est beaucoup plus étalée. L'indicateur "coexistence" confirme encore que les gestions différentes d'interaction ne sont pas équivalentes.

- Indicateur "corrélation des comportements" selon [Parunak et al. , 2003]

Enfin, pour analyser le degré de co-dépendance des agents, regardons l'indicateur préconisé par [Parunak et al. , 2003] présenté au début de ce chapitre. Les auteurs calculent la *corrélation* entre agents en s'inspirant de l'indice de Shannon.

Pour cela, ils associent à chaque action j (parmi n_i possibles) d'un agent a_i , une probabilité p_{ij} . Le comportement de l'agent a_i se mesure alors sur la base du calcul de l'entropie (indice de Shannon) de la façon suivante :

$$H(a_i) = - \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \cdot \log_2(p_{ij})$$

De la même manière, ils calculent l'entropie du SMA. Pour un système σ composé de deux agents a_1 et a_2 , on a :

$$H(\sigma) = H(a_1, a_2) = - \sum_{j=1}^{n_1 \cdot n_2} p_j \cdot \log_2(p_j)$$

La différence $I(\sigma)$ des entropies individuelles avec l'entropie globale du SMA permet alors d'estimer la corrélation des comportements des agents.

$$I(\sigma) = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} H(a_i)}{nbA} - H(\sigma) \quad *^{73}$$

Plus $I(\sigma)$ est élevé et plus les comportements des agents sont *statistiquement* dépendants les uns des autres. A noter que cette estimation est uniquement statistique car deux agents totalement indépendants mais effectuant les mêmes activités, seraient considérés comme co-dépendants par ce calcul.

Pour appliquer cette formule à ce modèle de consommation d'une ressource commune, considérons que les actions élémentaires des agents sont les méthodes "consume()" et "doNothing()" notées respectivement m_1 et m_2 . Sans s'intéresser aux raisons qui poussent un agent à exécuter l'une ou l'autre de ces activités, on peut associer à chacune d'elles une probabilité P équivalente : $P_{ai}(m_1) = P_{ai}(m_2) = 1/2$. Dans cette situation d'autonomie pure, l'entropie d'un agent vaut 1 :

$$H(a) = -\sum_{j=1}^2 1/2 \cdot \log_2(1/2) = -\sum_{j=1}^2 (-1/2) = 1$$

Pour un "pas de temps" de simulation, l'entropie du système σ se calcule en sommant le nombre d'actions m_1 et m_2 exécutées par tous les agents. La probabilité $P_\sigma(m_i)$ associée à chaque méthode m_i vaut alors :

$$P_\sigma(m_i) = nb(m_i) / \sum_{j=1}^{n_j} nb(m_j)$$

La différence $I(\sigma)$ s'écrit alors $I(\sigma) = 1 - H(\sigma)$ (1)

avec $H(\sigma) = -\sum_{j=1}^2 P_\sigma(m_j) \cdot \log_2(P_\sigma(m_j))$ (2)

Concrètement, un compteur somme le nombre de méthodes "consume()" et "doNothing()" exécutées par les agents à chaque pas de temps. Puis la formule (2) donnant $H(\sigma)$ est calculée et le résultat $I(\sigma)$ (formule 1) est mémorisé pour chaque "pas de temps". L'avantage de cet indicateur est qu'il permet d'estimer une corrélation des activités de plusieurs agents sans rentrer dans des calculs sophistiqués de covariances multiples.

La figure suivante montre les résultats de cet indicateur de corrélation entre les comportements des agents.

⁷³ La formule donnée par [Parunak et al. , 2003] est $I(\sigma) = \sum_{i=1}^{N_a} H(a_i) - H(\sigma)$. Je l'ai modifié de manière à obtenir une valeur de $I(\sigma)$ toujours comprise entre 0 et 1.

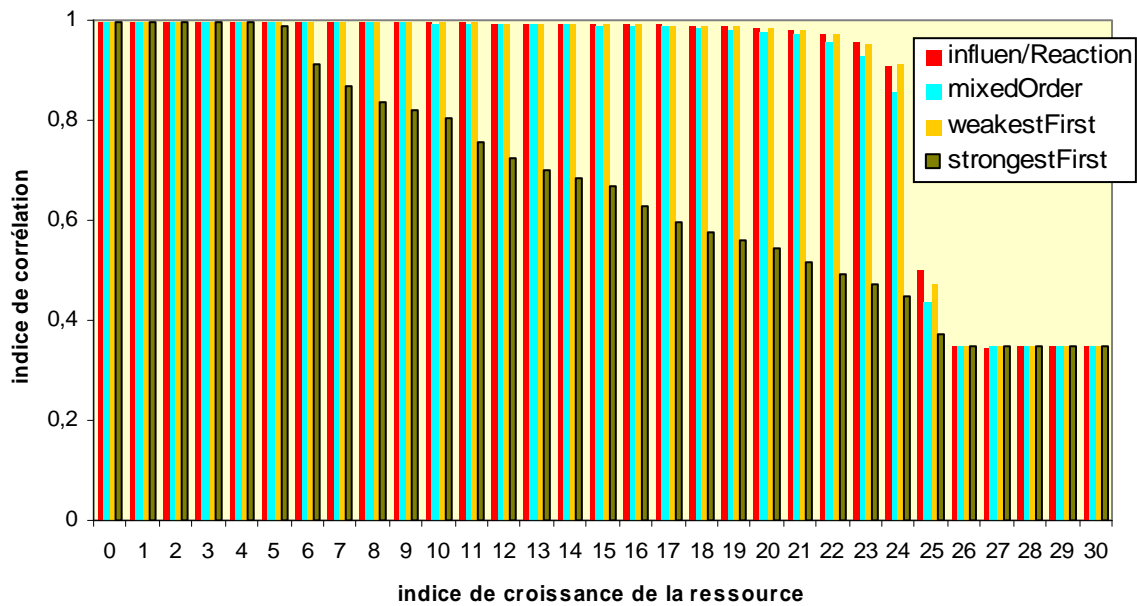


Figure 7-11 : Graphe comparatif des corrélations entre les comportements des agents en fonction de la régénération de la ressource. Chaque barre représente la moyenne de 100 simulations composées de cinq agents.

Contrairement aux autres indicateurs, les dispersions des moyennes de $I(\sigma)$ sont très étroites. Les moyennes tracées ici ne cachent donc pas d'autre information.

Dans le cas d'une ressource abondante pour la taille de la population, cet indicateur est identique pour tous les scénarios. Dans ces situations d'abondance, les agents se nourrissent à volonté et leurs activités sont indépendantes les unes des autres, ce qui explique une corrélation faible. Mais, étant donné que leurs choix se limitent à seulement deux activités, ils ont statistiquement des chances non nulles d'être corrélés (indice = 0,35 au lieu de 0).

Mais lorsque la dynamique de la ressource est plus faible, l'indicateur de Parunak montre que les comportements des agents sont corrélés. En effet, les agents sont rapidement en manque d'énergie et ils essaient donc de consommer le peu de ressource disponible. Ils sont donc tous dans le même état de demande et ils activent tous la méthode "consume()". Par conséquent, la corrélation entre les comportements est forte. Cette explication est valable pour tous les scénarios à l'exception du dernier, "strongestFirst" qui montre une courbe de réaction bien différente. Pour ce scénario où les "plus forts" se nourrissent les premiers, la corrélation entre les activités est moins prononcée : si les plus faibles ne cherchent qu'à consommer, les plus forts s'étant alimentés les premiers sont moins souvent en situation de faim et peuvent par moment choisir l'autre activité.

Pour cet indicateur, nous observons également une disparité des réponses des scénarios. Toutefois, ici ce n'est pas le scénario "Influences-Réaction" qui diffère des autres. Contrairement aux conclusions présentées dans [Michel et al., 2003], l'indicateur de corrélation confirme à nouveau que des gestions différentes d'interaction ne sont pas équivalentes.

7.2.3 Modèle sans interaction

"Termites", le modèle bien connu que [Resnick, 1994] présente pour illustrer les simulations massivement parallèles, est composé d'agents termites positionnés sur un espace discrétisé où sont aussi répartis aléatoirement des morceaux de bois. A partir de comportements extrêmement

simples des termites⁷⁴, les simulations laissent apparaître la formation de tas de copeaux qui s'agrègent progressivement au cours du temps en un tas unique (cf. figure suivante).

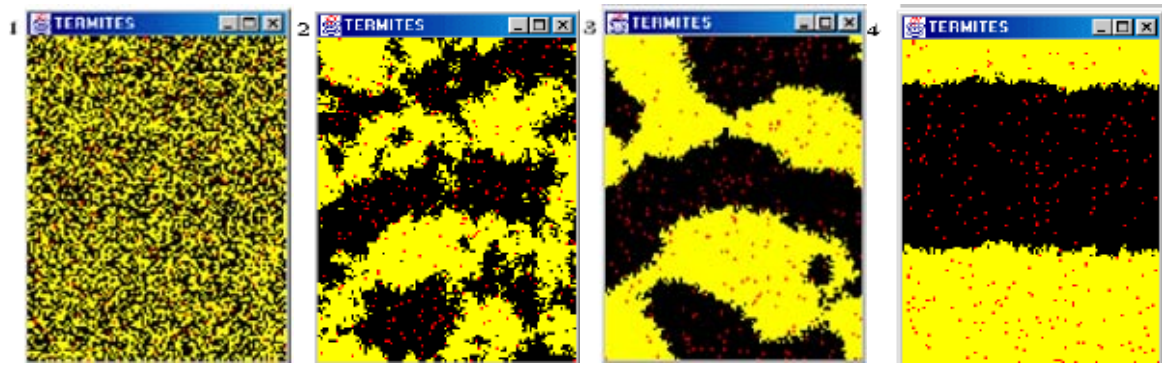


Figure 7-12 : Quatre étapes de l'évolution du modèle "Termites" montrant la formation d'un tas unique de copeaux de bois (en noir) par l'action simple de termites (en rouge). D'après [Michel, 2004]

En suivant la définition de [Müller, 2002], on peut considérer qu'il s'agit ici d'un phénomène émergent : au niveau global, l'agrégation des copeaux de bois suit une loi qui n'est pas spécifiée au niveau des agents. Les termites n'ont à aucun moment de vision globale de leur comportement et n'ont pas même conscience de participer à la formation du tas (émergence faible).

Pour ce modèle, n'importe quelle gestion du temps provoquera ce phénomène d'agrégation. Par ailleurs, on obtient le même résultat en initialisant le simulateur avec un seul termite; la durée virtuelle de la simulation doit simplement être plus longue. Le fait de multiplier le nombre de termites permet seulement d'accélérer la formation du tas. On en déduit que dans cet exemple, les agents, bien qu'interagissant avec leur environnement, ne sont pas en situation d'interaction directe. Ce qui fait dire à certains que ce genre de modèles n'appartient pas aux systèmes multi-agents. Est-ce sur l'absence d'interaction directe que repose cette exclusion ? Alors, qu'elle est la différence avec le modèle précédent où les agents n'interagissent pas non plus directement ? Serait-ce simplement dû au fait que dans l'exemple des termites, les agents ne sont pas en situation de compétition ? Peut-être bien. Toujours est-il que ce critère paraît bien fragile pour exclure du domaine un certain nombre d'applications. Car, comme le laissent apercevoir les exemples de ce chapitre, la notion d'interaction reste encore un sujet délicat qui n'offre pas de solution clé en main mais qui exige une réflexion poussée pour chaque cas.

7.3 DISCUSSION

En cherchant à mieux comprendre l'importance de la simultanéité des interactions, [Michel et al., 2003] aboutissent à la conclusion que les SMA mettent en œuvre deux grands types d'interactions :

- Les interactions fortes qui peuvent fréquemment affecter l'autonomie des agents et contrarier leurs objectifs.
- Les interactions faibles qui n'affectent pas l'autonomie décisionnelle des agents.

Ils définissent la notion d'interaction forte de la façon suivante :

⁷⁴ Le comportement d'un termite suit la règle simple suivante :

si je ne porte pas de copeau, je me déplace aléatoirement dans mon voisinage ;

si je ne porte pas de copeau et si j'en trouve un, je le prends et je me téléporte ailleurs ;

si je porte un copeau et que j'en trouve un autre, je repose celui que je porte sur une place libre à côté du nouveau

Une applet issue de Starlogo est disponible ici :

<http://www.cs.utk.edu/~mclennan/Classes/420/experiments/termites.html>

*Plusieurs actions constituent une situation d'interaction forte lorsque la réalisation du but de chaque agent dépend de l'action d'autres agents. Pour être réalisé, l'événement correspondant nécessite la conjonction de plusieurs comportements autonomes particuliers. Le résultat d'une telle interaction ne peut être calculé sans prendre en compte la **délibération** de l'ensemble des agents concernés, sans quoi leur autonomie décisionnelle ne peut être garantie. [Michel, 2004]*

Les interactions fortes caractérisent donc des *interactions directes* qui affectent des paramètres internes des agents. Elles se manifestent par exemple lors de phénomènes de reproduction croisée ou lors de capture d'une proie par un prédateur ou lors d'échanges marchands entre un vendeur et un acheteur. Elles touchent effectivement au problème de l'autonomie des agents. Michel préconise la mise en place de modules interactionnels pour les traiter car leurs impacts sur les dynamiques sont importants et elles sont facilement sujettes à générer des biais.

Les interactions faibles caractérisent des *interactions indirectes*, via un environnement par exemple. Les modèles "termite" et de prélèvement d'une ressource montreraient qu'il n'est pas nécessaire de les traiter par des modules interactionnels sophistiqués (comme le principe "Influences-Réaction"). Ils définissent alors l'interaction faible de la façon suivante:

Plusieurs actions constituent une interaction faible lorsque le but de chaque agent peut être réalisé indépendamment des autres actions. Dans cette situation, bien que ces actions puissent interférer entre elles, et quelle que soit la gestion des interactions, l'autonomie des agents n'est pas remise en cause par la technique utilisée. [Michel, 2004]

Dans le cas de l'utilisation de ressources communes, [Michel et al., 2003] sont surpris de constater que "le principe Influences-Réaction" n'apporte pas une amélioration de l'espérance de vie des agents". Ils concluent alors qu'un traitement de la simultanéité des actions (pour ce type d'interactions) n'est pas indispensable et les méthodes classiques de brassage aléatoire semblent suffisantes, car les différentes gestions de ces interactions faibles n'influencent pas les résultats des simulations. Ces conclusions faciliteraient le travail du modélisateur en simplifiant ses choix de gestion des interactions. En effet, l'identification d'une interaction faible (ou indirecte) limiterait le choix à une gestion simple du temps sans se poser davantage de questions.

Malheureusement, l'expérience de réplique que j'ai présentée dans ce chapitre et ses analyses réfutent ces conclusions sur la manière simple de gérer les interactions faibles :

- L'indice de corrélation des comportements selon [Parunak et al., 2003] appliquée à notre modèle, indique au contraire que l'exploitation conjointe d'une ressource peu productive, influence le comportement des agents en compétition.
- Pour des domaines du modèle où la coexistence entre agents est envisageable à moyen terme (zone intermédiaire), l'indicateur "date de la première exclusion" montre également des différences entre les scénarios de gestion.
- Enfin, l'étude de la coexistence des agents exploitant une même ressource montre des différences systématiques entre les scénarios.

Par conséquent, la façon de gérer le temps pour les interactions indirectes, influence les résultats du modèle, même s'il est probable que les impacts soient moins significatifs que dans le cas d'interactions directes. Ainsi, quel que soit le type d'interaction, il est indispensable de les identifier pour les traiter avec le plus grand soin (cf. Figure 5-24, p. 121). Néanmoins, il n'est pas obligatoire d'utiliser des architectures sophistiquées de type "Influences-Réaction" pour les gérer.

Par ailleurs, et c'est le plus important à mon point de vue, le scénario de gestion par "Influences-Réaction" tel que proposé par [Michel et al., 2003] n'est pas un modèle neutre : il conçoit l'utilisation d'une ressource selon un *partage équitable* entre les agents. Or ce choix ne doit pas être édicté par la technique informatique mais doit être compris comme une décision explicite du modélisateur. Les autres scénarios que j'ai produits dans ce chapitre constituent d'autres modèles. Aucun des quatre n'est neutre.

D'autres scénarios sont également envisageables. On aurait pu tester par exemple une contrainte spatiale interdisant l'accès à la ressource pour les derniers arrivés. On aurait alors testé les trois scénarios de type séquentiel avec cette nouvelle contrainte et les résultats auraient sans doute été encore différents. Pour des scénarios de type 2 (influence/réaction), on aurait aussi pu imaginer d'autres "lois de l'univers" provoquant des réactions différentes de la ressource. Enfin, on pourrait aussi imaginer des scénarios stochastiques tels que présentés dans [Lawson & Park, 2000] ou [Axtell, 2001] (qui parle d'activation binomiale) pour lesquels l'activation des agents suit une loi de probabilité : statistiquement les agents sont activés autant de fois les uns que les autres, mais des variations stochastiques conduisent certains à être plus activés que d'autres. A n'en pas douter, chacun de ces scénarios aurait donné des résultats encore différents, car ils proposent tous une représentation du monde différente⁷⁵.

Les modalités d'accès aux ressources communes constituent donc un problème sensible et la "tragédie" de leur surexploitation est davantage liée à leur accès libre qu'à leur caractère commun. Le petit modèle présenté ici révèle la diversité des impacts que peuvent produire différentes stratégies de gestion pour y accéder. Techniquement, aucune de ces stratégies n'est meilleure qu'une autre. Le modélisateur doit simplement réaliser que la gestion des interactions qu'il choisit appartient au domaine modélisé. Ses choix doivent être clairs, explicites et justifiés. Etant donné qu'une gestion des interactions peut parfois influencer le comportement du modèle, il est recommandé de tester les conséquences de ses choix.

7.4 CONCLUSION

Les notions de gestion du temps, d'autonomie et d'interactions sont étroitement imbriquées. En effet, la sensibilité d'un modèle est souvent liée à l'ordonnancement temporel de l'activation des agents ou à la gestion des simulations événementielles, ou encore à la manière de faire interagir les agents. Sans fournir les caractéristiques précises à observer pour la conception d'un modèle, cette deuxième partie pose les jalons pour la prise en compte de ces phénomènes afin d'en limiter les effets de "divergence implémentatoire".

Certes, la simultanéité des actions est difficile à appréhender, mais elle se pose essentiellement lors d'interactions directes entre agents ou indirectes via l'environnement. Dans le cas d'interactions directes, l'autonomie de l'agent risque d'être altérée, ce qui peut perturber profondément son comportement. Si les interactions indirectes ne remettent pas en cause nécessairement l'autonomie de l'agent, elles peuvent néanmoins entraîner des biais lorsqu'elles sont mal traitées.

Malgré les apparences, ces difficultés ne constituent pas un obstacle uniquement d'ordre technique. Elles ne doivent pas nous obliger à utiliser systématiquement un modèle de l'interaction, de type MIC* ou "Influences-Réaction". D'ailleurs, le fait que les agents agissent de manière séquentielle et non simultanée est-il réellement un problème pour tout modèle ? Pour des modèles traitant de l'accès et de l'utilisation des ressources renouvelables, la simultanéité des actions n'est pas forcément la règle à suivre. Il n'est pas nécessaire d'appliquer un traitement sophistiqué de l'interaction comme il est utilisé pour des collisions de boules de billard ou pour résoudre des conflits d'ouverture de porte ! Pour aborder la gestion des ressources, une gestion standard des interactions par ordonnancement avec prélèvement directe sur l'environnement a ses avantages.

En effet, l'utilisation de modules interactionnels tels que "Influences-Réaction" n'est pas toujours sans conséquence sur le comportement du modèle. Car aucune de ces gestions n'est une solution

⁷⁵ Sur ce sujet, Uchmanski et Grimm notent que : *"Differences are likely to appear only when resources are in short supply. In the classical models, limited resources account for the reduction of reproduction of an average individual. In the models with different individuals, the weakest individuals will mainly feel the consequences of resources limitation."* [Uchmanski & Grimm, 1996]

neutre. Ainsi, parce que la gestion des interactions, directes ou indirectes, fait partie intégrante du modèle, le concepteur doit la prendre en charge totalement, la spécifier et la justifier.

Si aucune solution clé en main n'existe, il faut revenir à la question posée à l'origine de toute modélisation. Celle-ci sert constamment de fil directeur pour guider le travail tout au long du processus. Pour y répondre, une représentation "réaliste" du monde n'est pas indispensable.

TROISEME PARTIE :

AMELIORER LA FIABILITE ET LA LISIBILITE DES MODELES

MULTI-AGENTS

Chapitre 8

EXPLORATION DES MODELES

*On ne connaît un objet qu'en agissant sur lui et
en le transformant.*

Jean Piaget, Psychologie et épistémologie, 1970

L'expérience que j'ai relatée au Chapitre 5 (cf. 5.3.2, page 117) sur l'analyse du modèle Mopa (pêche artisanale au Sénégal), montre l'importance de la phase d'exploration d'un modèle. Ce travail constitue une étape indispensable du processus de modélisation. Il permet non seulement de révéler et de corriger des points de non-fonctionnement du simulateur, mais surtout il procure à celui qui mène cette analyse, une meilleure compréhension des comportements du modèle. Cette connaissance lui permet de mieux anticiper les réactions du modèle, de mieux en expliquer les résultats et d'apporter des éléments de réponses aux questions posées à l'origine du processus. Enfin, comme le souligne [Ginot, 2003], en réfutant des certitudes "cette analyse peut bousculer les idées reçues, il serait dommage de s'en passer".

Or cette étape d'exploration est souvent négligée, car après la phase de conception puis d'implémentation, il reste peu de temps pour aborder cette nouvelle phase du processus. Toujours dans le souci de "plus de réalisme", on préfère souvent complexifier encore le modèle, plutôt que de le secouer dans tous les sens pour en comprendre toutes les implications. Pourtant, comme [Saltelli et al., 2000] le soulignent, l'analyse de sensibilité est un "ingrédient indispensable de la modélisation".

Je sais par expérience que cette phase peut s'avérer rapidement fastidieuse. En effet, un modèle multi-agent contient souvent un grand nombre de paramètres. Une analyse systématique de chacun demande beaucoup de temps et génère un grand nombre de fichiers. De plus, il est nécessaire de croiser l'analyse des paramètres entre eux pour obtenir des réponses multidimensionnelles du modèle. Autant dire qu'en termes de temps de calcul, il devient rapidement impossible d'explorer systématiquement tout l'espace paramétrique d'un modèle, même très simple⁷⁶.

Si la plupart des plates-formes disposent d'options graphiques pour visualiser des variables, toutes ne proposent pas d'outils pour explorer facilement un modèle. Il ne s'agit pas uniquement de modifier facilement la valeur des paramètres (sans entrer dans le code) ou de le faire varier progressivement sur une gamme de valeurs ou encore de répéter des simulations, mais aussi de sauvegarder les résultats sous forme de fichiers facilement manipulables : traiter un millier de fichiers ASCII est une tâche ingrate qui favorise les erreurs de manipulation. Dans Cormas, un module d'analyse de sensibilité permet de générer facilement des plans d'expérience sans toucher au code du modèle. Les variables en sortie (appelées sondes), associées à des informations concernant les conditions de chaque simulation (valeurs des paramètres, valeur de la graine aléatoire, etc.) peuvent être sauvegardées sous forme de feuilles dans un fichier Excel ou exportées vers une base

⁷⁶ Etant donné le nombre d'interactions plus ou moins directes qui surviennent lors d'une simulation, on ne peut pas faire l'hypothèse que la réponse du modèle pour des valeurs conjointes de deux paramètres est identique à la simple somme des réponses de chaque paramètre pris isolément. Pour p paramètres (analyse multi-facteur) que l'on fait varier sur v valeurs, on faut donc v^p simulations. Ainsi, un plan d'expérience complet de 6 paramètres variant sur 10 valeurs chacun, nécessite un million de simulations et 10^8 s'il s'agit d'un modèle stochastique.

de données relationnelles (type Access). Le traitement des résultats nécessite souvent un logiciel de statistique adapté, type SAS ou R (<http://www.r-project.org/>).

Sous le terme analyse de sensibilité, on regroupe souvent plusieurs aspects de l'exploration d'un modèle. [Ginot et Monod, 2006] répertorient différentes techniques statistiques pour mener ces analyses (ils préconisent d'ailleurs l'utilisation des ANOVA). Le chapitre 9 de [Grimm & Railsback, 2005] est également dédié à ce sujet. Les auteurs dressent un panorama des différentes techniques employées, mais leur grande expérience de la simulation leur procure également un regard critique et pertinent sur ces pratiques.

8.1 ANALYSE DE LA STRUCTURE : VERIFIER LA COHERENCE DES COMPORTEMENTS INDIVIDUELS

[Grimm & Railsback, 2005] estiment qu'une analyse de sensibilité est indispensable, mais qu'elle doit suivre une étape antérieure : l'analyse de la structure du modèle. Car, un bon ajustement à des données ne permet pas de distinguer les parties du modèle qui sont correctes de celles qui ne le sont pas. En fait, la validité d'un modèle dépend plus de la qualité de sa structure et de ses mécanismes que de la finesse de réglage de ses paramètres. Or pour apprécier cette structure, il est nécessaire de revenir sur les objectifs initiaux du modèle. Après avoir implémenté un simulateur, il faut de nouveau s'interroger sur ce que l'on souhaite faire de ce travail et comment concevoir des expérimentations qui permettent de répondre aux objectifs que l'on s'était fixés⁷⁷. Pour essayer d'y répondre, il est recommandé de poser des hypothèses alternatives et de conduire des simulations qui permettraient de déterminer quelles sont celles qui ont échoué à reproduire le phénomène global que l'on cherche à comprendre.

Ces analyses nécessitent une démarche ascendante (bottom-up), car avant de tester la valeur générale d'un modèle, il faut vérifier la validité des comportements individuels [Rouchier, 2006]. En effet, ne s'attacher qu'à des valeurs globales et moyennes ne permet pas d'identifier des aberrations au niveau individuel. Ainsi par exemple, la taille moyenne des individus peut sembler correcte pour une population, alors même que certains d'entre eux ont grandi de façon absurde et arborent des dimensions irréalistes. Or ces analyses individuelles sont souvent difficiles à mener. Evidemment, on ne pourra pas suivre tous les agents, un par un. Il faut se limiter à quelques individus choisis aléatoirement ou ayant des comportements contrastés.

Les outils mis à disposition par les plates-formes de simulation peuvent beaucoup aider à la réalisation de cette tâche. Cormas, par exemple, propose un inspecteur des valeurs des attributs qui s'ouvre lorsqu'on sélectionne un agent. On peut également ouvrir des graphiques individuels montrant l'évolution des sondes sur l'agent ciblé. Dans sa dernière version, Cormas permet de manipuler directement les agents à la souris. On peut alors les déplacer dans un endroit qui semble plus critique pour tester leur comportement, ou bien leur demander d'exécuter une méthode particulière. L'intérêt des langages interprétés joue beaucoup pour cette phase car ils facilitent le suivi pas à pas de l'agent. Ils permettent de contrôler son comportement lors de situations délicates ou de relancer des opérations qui semblent étranges. Mobydic est la seule plate-forme à ce jour à offrir la possibilité de "remonter le temps". Pour mieux comprendre une situation donnée, l'utilisateur peut cliquer sur un bouton "retour" afin de revenir au moment précédent. A l'instar d'un inspecteur de police étudiant une bande vidéo, cette option permet à l'utilisateur d'examiner à la loupe le comportement d'un agent et d'explorer tous les choix possibles qui s'offrent à lui. NetLogo dispose d'une option ("riding the turtle") qui offre une vue subjective d'un agent. On s'approche ici

⁷⁷ Pour ce point de grammaire, je vous conseille d'aller jeter un œil ici : http://www.tv5.fr/TV5Site/lf/merci_professeur.php?id=2616

du monde du jeu vidéo où le joueur manipule un agent-avatar⁷⁸ immergé dans un monde en 3D. Tous ces outils permettent d'examiner les comportements des agents et de tester ainsi la fiabilité du simulateur. Cette étape indispensable constitue un pré-requis avant l'analyse de sensibilité. Elle offre aussi l'intérêt de mieux comprendre les conséquences des règles que contient le modèle et d'en expliquer les dynamiques.

Afin de faciliter encore une analyse ascendante, il est recommandé d'étudier séparément des parties du simulateur. En effet, les interactions entre agents et le comportement global du système simulé influencent les actions d'un agent. Pour mieux examiner ses activités, il est préférable de contrôler son environnement. A partir de fragments isolés du modèle, on peut alors mieux vérifier des comportements de base à travers ce que [Grimm & Railsback, 2005] appellent des scénarios irréalistes. Mais malgré l'utilisation de langages objets, un simulateur ne peut pas tout à fait être considéré comme un assemblage de briques. En conséquence, ces scénarios irréalistes nécessitent souvent d'intervenir sur le code pour stabiliser des variables et dénaturer certaines interactions.

Parmi les travaux que j'ai menés avec M. Antona, le modèle du bois-énergie au Niger illustre cette démarche de dégradation d'un modèle pour en vérifier le fonctionnement. En voulant étudier un cas de surexploitation des ressources en bois, M. Antona a conçu un modèle multi-agent (appelé MOBE) représentant des processus de déforestation périurbaine liés à l'approvisionnement des villes du Niger en bois de chauffage (pour la cuisine !) [Antona et al., 2002]. Dans ce contexte, elle s'est intéressée à différents instruments de politiques publiques face à des normes collectives. Elle a notamment cherché à analyser l'efficacité d'instruments politiques qui visent à réguler l'exploitation du bois de chauffage [Antona et al., 2005].

Son modèle présente une dynamique spatialisée de la production naturelle de bois. Cette ressource est exploitée par une filière composée d'agents collecteurs, de transporteurs et de consommateurs urbains. En amont de cette filière, les collecteurs ramassent du bois dans un rayon qui leur est imparti. En fonction de la demande des transporteurs et de la disponibilité de la ressource mais aussi des quotas imposés, chaque collecteur stocke des quantités de bois qu'il vend lors de la tournée des transporteurs. Chaque marchand (ou transporteur) calcule les quantités de bois dont il a besoin pour l'année en cours sur la base des demandes des consommateurs et du prix du marché. Il établit ainsi un prix de base qu'il est prêt à payer aux agents collecteurs. Ce calcul obéit à une règle économique établie par Mordecai Ezekiel, connue sous le nom de "théorème de Cobweb" [Ezekiel, 1938]. Comme dans de nombreux modèles économiques, les marchands sont considérés comme des agents rationnels qui essaient d'anticiper le prix du marché. Selon la pensée dominante, le prix du marché est alors sensé converger vers un prix d'équilibre (demande élastique). Mais comme le montre la figure suivante, on peut constater le résultat inverse selon la pente des courbes d'offre et de demande (demande rigide):

⁷⁸ Les notions de "first-person shooters" et avatar traduisent l'idée d'une vision subjective qui donne l'illusion au joueur de se retrouver dans le corps d'un personnage en percevant son environnement immédiat.

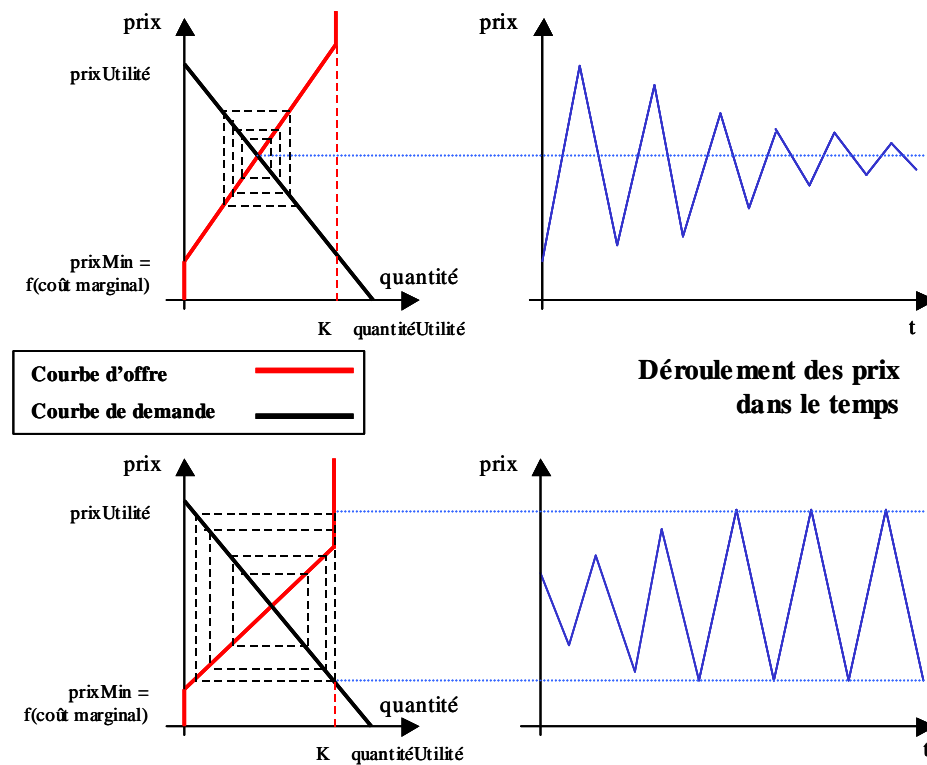


Figure 8-1: Le modèle du Cobweb. En partant d'une quantité q_0 , on obtient un prix p_1 en fonction de la courbe de demande. Ce prix conduit à offrir une nouvelle quantité q_1 qui permet de réviser le prix antérieur, et ainsi de suite jusqu'à convergence vers un prix d'équilibre (graphiques du haut), ou bien jusqu'à des oscillations de grande amplitude selon les pentes des courbes d'offre et de demande (graphique du bas).

A la différence des modèles économiques standards à deux agents (consommateur – vendeur), MOBE possède plusieurs agents qui agissent à des moments et dans des lieux différents. De plus, ils sont intégrés au sein d'une filière dont l'approvisionnement en amont est fourni par des agents collecteurs dépendants d'une ressource dynamique. Bien qu'établi sur des règles économiques claires et reconnues, la structure de MOBE est bien plus compliquée que le modèle de Cobweb. Les sorties qu'il affiche ne sont pas toujours évidentes à expliquer. Pour vérifier son fonctionnement, il a donc fallu le dénaturer et appauvrir sa structure. Dans une version dégradée, nous avons, de façon irréaliste, forcé les collecteurs à fournir à la filière les quantités demandées, même si le bois disponible n'était pas suffisant. Les prix constatés sur le marché montraient alors des résultats similaires à ceux établis par la règle économique de Cobweb. Cette vérification a donc servi de base solide et nous a redonné confiance dans la structure originale du modèle multi-agent.

8.2 ANALYSE DE SENSIBILITE

Pour examiner la façon dont les sorties d'un modèle répondent à des variations de paramètres, il est d'usage de mener des analyses de sensibilité. Comme une analyse exhaustive est impossible, le modélisateur doit faire des choix sur les paramètres à analyser : leur gamme de variation, le taux de variation, le nombre de répétitions dans le cas de simulations stochastiques, mais aussi le couplage de l'analyse avec d'autres paramètres.

8.2.1 Choix des indicateurs (sondes)

Un autre point important de cette analyse est le choix des sondes que l'on souhaite recueillir. En effet, on peut étudier un SMA à deux niveaux distincts d'analyse : soit au niveau global, donnant par exemple le nombre d'agents d'une population ou la date de son extinction, soit au niveau

individuel (niveau de pollution d'une rivière, rente d'une famille, etc.). Généralement, les analyses de sensibilité se limitent au niveau global. Ceci semble suffisant et demande déjà beaucoup d'investissement, mais en tant que co-développeur de Cormas, j'ai été surpris de recevoir de nombreuses demandes pour automatiser aussi des sauvegardes de sondes individuelles.

Par ailleurs, le choix de l'indicateur pour déterminer la sensibilité du modèle, est également très important. Dans l'expérience que j'ai décrite sur le modèle "Influences faibles – influences fortes", on observe des sensibilités différentes des indicateurs (la "durée avant première exclusion", l'indice de "coexistence" et la "corrélation des comportements" ne répondent pas toujours de la même manière). Les objectifs qui ont motivé la modélisation doivent aider à la détermination de ces indicateurs [Saltelli et al., 2003].

Enfin, l'indicateur étudié dépend de la façon dont on le recueille. Ne prendre en compte que sa moyenne sur l'ensemble d'une simulation peut cacher des informations importantes sur la sensibilité du modèle. Par exemple, dans le cas de l'équation logistique discrète, le graphe des bifurcations (A) peut être complètement gommé si on n'observe que la moyenne de la taille de la population (B et C). Les figures suivantes illustrent ce phénomène :

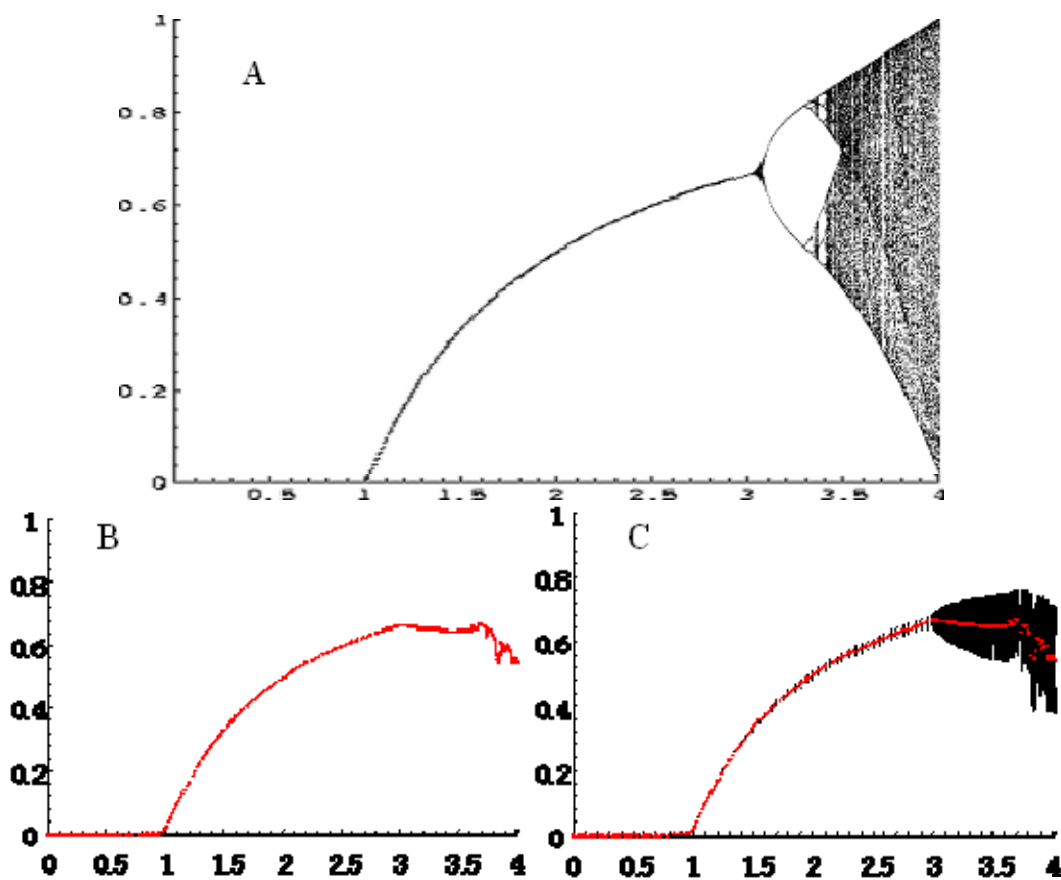


Figure 8-2 : Analyse de sensibilité du modèle de Verhulst discret : $X_{t+1} = a \cdot X_t (1 - X_t)$. Pour chaque simulation de 1000 pas de temps, on étudie les réponses du modèle aux variations du paramètre a qui varie de 0 à 4 en augmentant de 0,001 à chaque simulation :

(A) représente la valeur de X_{1000} à $t=1000$ (A s'appelle le "graphe des bifurcations"),

(B) ne montre que la moyenne pour chaque simulation et cache ainsi toute la complexité des réactions du modèle,

(C) rajoute l'écart-type associé à chaque moyenne

Les analyses présentées dans [Ginot, 2003] par exemple sont basées sur des valeurs de l'effectif total d'une population de poissons en "fin de simulation". Evidemment, si la simulation ne se stabilise pas ou bien si elle est entrée dans un cycle d'oscillations, la "fin de la simulation" sera plus problématique à déterminer.

L'erreur commise par [Michel et al., 2003] dans leurs conclusions, est liée justement au phénomène de nivelage de la moyenne. Ceci est renforcé par le fait que ces résultats reposent sur une moyenne calculée d'après l'ensemble des simulations de l'analyse de sensibilité.

8.2.2 Enquête sur un modèle

Dans cette partie, sont présentées les différentes techniques d'analyse de sensibilité. Pour les illustrer, nous reprendrons le modèle ECEC déjà décrit au chapitre 4.3.2 et présenté en détail en annexe 3 (p. 294).

Depuis que nous l'utilisons, des parties de son implémentation ont été modifiées pour être encore plus synthétique. Or nous nous sommes aperçus après quelques temps que des extinctions de la population des agents "non-restreints" étaient bien plus fréquentes qu'auparavant (autour de 29% de double extinction lors de simulations effectuées avec les paramètres réglé par défaut).

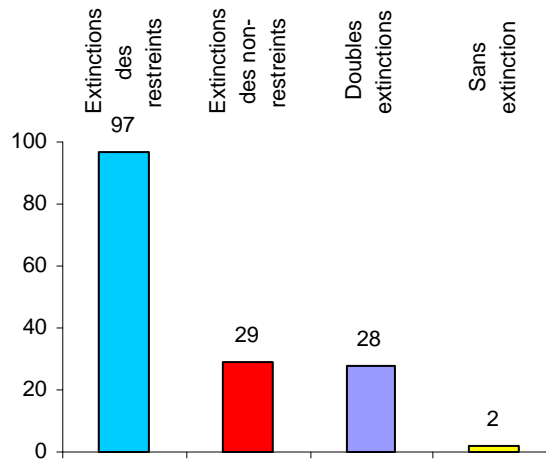


Figure 8-3 : Nombre d'extinctions des populations d'agents relevées sur 100 simulations standards du modèle ECEC. Parmi les 97 extinctions des restreints, 28 se sont accompagnées de celles des non-restreints. 2 simulations ont montré la coviabilité des deux populations et une seule s'est soldée par la survie des restreints.

Nous avons donc remis en doute les améliorations de l'implémentation ainsi que celles qui touchent à Cormas, sans trouver la faille. Seule une analyse de sensibilité m'a permis de comprendre d'où provenaient ces extinctions. C'est cette enquête que je vous propose de suivre maintenant...

8.2.3 Sensibilité locale

8.2.3.1 Présentation de la sensibilité locale

Elle s'attache à décrire l'impact local des facteurs d'entrée sur le modèle. Elle repose sur le principe consistant à calculer les dérivées partielles des fonctions de sorties par rapport aux variables d'entrée. Plus formellement, on exprime la sensibilité $S_{i,j,t}$ d'un paramètre p_i comme la dérivée partielle de la sortie j du modèle M à l'instant t , par rapport au paramètre p_i :

$$S_{i,j,t} = \frac{\partial M_{j,t}}{\partial p_i} \quad (8.1)$$

Malheureusement cette formule de sensibilité (encore appelée sensibilité locale) ne s'applique qu'aux paramètres et aux sorties à valeurs continues et dérivables. Pour les SMA, [Ginot et Monod, 2006] conseillent une approximation numérique qui consiste à faire varier les entrées du modèle dans un intervalle restreint autour d'une valeur nominale. Cette approche s'apparente à ce que certains appellent l'approche "One-Factor-At-A-Time" (OAT) [Saltelli et al., 2000], [Felix et Xanthoulis, 2005] : quand un paramètre varie, tous les autres sont constants. Pour comparer les

sensibilités respectives sur une même échelle (*SS* pour scaled sensitivity), l'indice de sensibilité est reformulé en le multipliant par Δp_i , ce qui donne un indice sans unité :

$$SS_{i,j,t} = \frac{\delta M_{j,t}}{\delta p_i} \times \Delta p_i$$

Si on fait varier les paramètres dans les mêmes proportions (variations relatives), on a $\Delta p_i = \alpha \cdot p_i$ et on peut écrire l'équation précédente de la façon suivante :

$$SS_{i,j,t} = \frac{\delta M_{j,t}}{\delta p_i} \times p_i \quad (8.2)$$

Pour obtenir une sensibilité sans dimension, il est préférable de travailler sur un indice normalisé (*NS*) :

$$NS_{i,j,t} = \frac{\delta M_{j,t}}{\delta p_i} \times \frac{p_i}{M_{j,t}} = \frac{\delta \ln(M_{j,t})}{\delta \ln(p_i)} \quad (8.3)$$

Cette dernière équation est donc une estimation de l'équation 9.1 qu'il faut utiliser pour l'analyse des SMA. Ainsi, pour estimer la sensibilité locale de la sortie j pour le paramètre p_i , on utilise la relation suivante :

$$S_{i,j} = \frac{\ln M_j - \ln M_{j,b}}{\ln p_i - \ln p_{i,b}} \quad (8.4)$$

où M_j et $M_{j,b}$ sont respectivement les réponses du modèle selon l'indicateur j aux paramètres p_i et $p_{i,b}$: p_i est le paramètre que l'on a fait varier d'un petit pourcentage autour de sa valeur de base $p_{i,b}$, les autres paramètres restant fixés. Ces calculs se font numériquement en faisant varier les entrées du modèle dans un intervalle très restreint autour d'une valeur nominale. Pour un modèle stochastique, M_j représente une espérance qui doit être estimée en répétant les simulations :

$$S_{i,j} = \frac{\overline{\ln M_j} - \overline{\ln M_{j,b}}}{\ln p_i - \ln p_{i,b}} \quad (8.5)$$

8.2.3.2 Sensibilités locales appliquées au modèle ECEC

Les graphes suivants montrent des résultats de cette analyse locale OAT pour le modèle ECEC. Toutes les valeurs des attributs présentés sur le diagramme de classe (présenté page 295) ont été modifiées. ECEC étant un modèle stochastique, le calcul des sensibilités a été calculé en répétant 15 fois les simulations et en faisant varier chaque paramètre de +15% lorsque c'est possible (ces données sont régulièrement utilisées dans la littérature mais souvent la variation est encore plus faible). Lorsqu'une augmentation n'est pas possible, par exemple pour les paramètres entiers, type "nombre initial d'agents", on passe de 10 agents à 11 agents manuellement (idem pour l'attribut "birthRange"). Pour certains paramètres comme l'attribut "harvestRate" des agents, la fluctuation est de -15% pour ne pas atteindre des taux de prélèvement supérieurs à 100%. Bref, pour mener ces analyses, il y a quelques précautions à prendre qui nécessitent une bonne connaissance du modèle et qui semblent exclure une automatisation de ces plans d'expérience car dans le cas de ECEC, un ajout de +15% à tous les paramètres ne fonctionnera pas. La figure suivante montre la sensibilité relative du niveau d'énergie moyen des plantes en fin de simulation (500^{ième} pas de temps) calculée selon l'équation 8.5 :

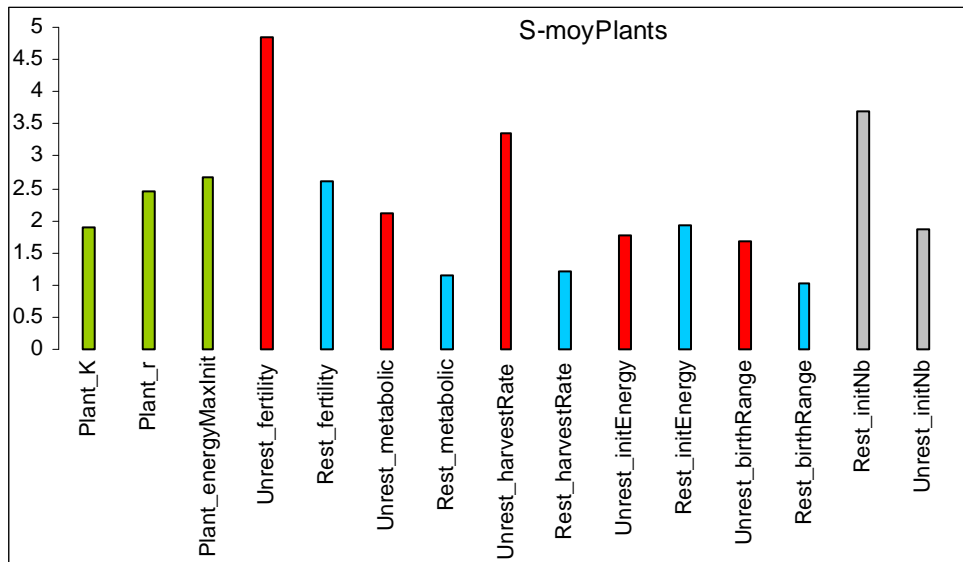


Figure 8-4 : Sensibilité locale pour la sortie "niveau d'énergie moyen des plantes" donné au dernier pas de temps (500). Les sensibilités (eq. (9.5)) sont présentées en valeur absolue. Les indices en vert correspondent à des attributs attachés à la classe Plant; les indices rouges et bleus indiquent respectivement des attributs des classes UnrestrainedForager et RestrainedForager. Les indices gris sont rattachés à la classe principale d'initialisation de simulation.

La sensibilité locale pour la sortie "niveau d'énergie moyen des plantes" dépend évidemment du paramètre que l'on fait varier (un indice inférieur à 1 signifie une absence de sensibilité au paramètre en entrée). L'histogramme ci-dessus montre ainsi une grande sensibilité du niveau d'énergie global des plantes au seuil de fertilité des agents "non-restreints" mais aussi à leur paramètre "harvestRate". Les plantes sont bien plus sensibles à des facteurs rattachés aux agents qu'à leurs propres paramètres. Etant donnée la pression qu'exercent les agents non-restreints sur l'environnement, ce résultat semble cohérent avec la majorité des observations des simulations, même si on peut s'étonner du fait que "harvestRate" soit moins important que le seuil de fertilité.

L'histogramme suivant montre la sensibilité locale de la taille de la population des agents restreints :

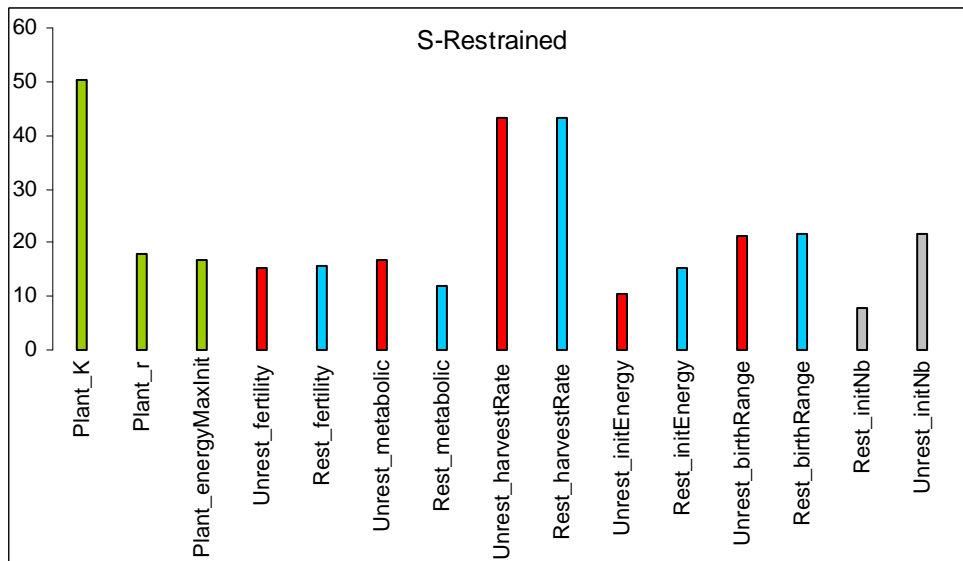


Figure 8-5 : Sensibilité locale pour la sortie "taille de la population des agents restreints" donnée au dernier pas de temps (500). Les sensibilités sont présentées en valeur absolue.

Le graphe montre que les agents restreints sont extrêmement sensibles aux paramètres K des plantes et aux taux de prélèvement des deux populations d'agents. Ces résultats sont assez

étonnants, car on se serait plutôt attendu à une sensibilité au facteur "harvestRate" des agents non-restreints uniquement. De même, on comprendrait mieux une sensibilité au taux de renouvellement r des plantes plutôt qu'au seuil maximum d'énergie K .

L'histogramme suivant montre la sensibilité locale de la taille de la population des agents non-restreints :

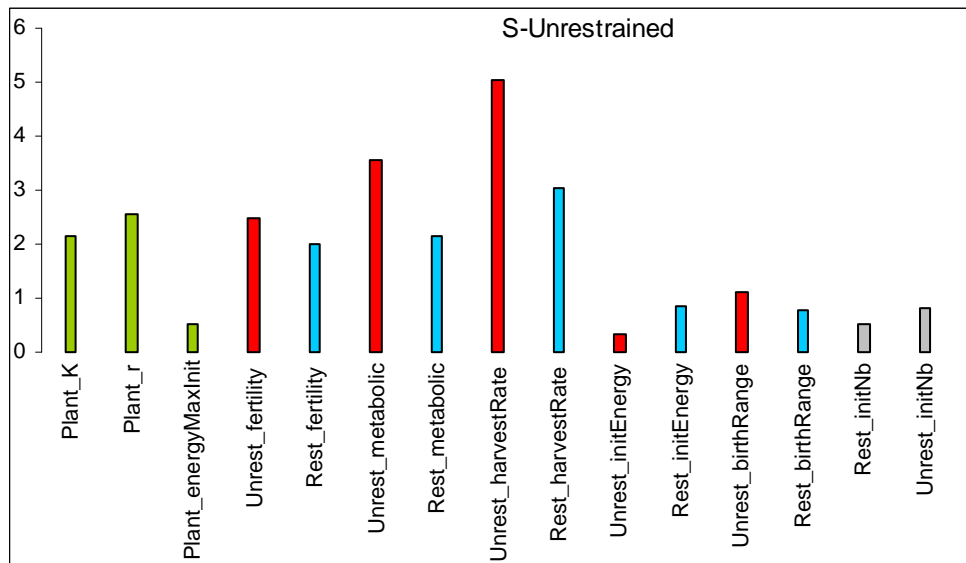


Figure 8-6 : Sensibilité locale pour la sortie "taille de la population des agents non-restreints" donnée au dernier pas de temps (500). Les sensibilités sont présentées en valeur absolue.

S'il semble normal que la taille de la population des agents non-retreints dépend essentiellement des trois paramètres "harvestRate", "metabolicRate" des agents et du taux de renouvellement r des plantes, il est étonnant de constater que les paramètres liés aux agents restreints (barres bleues) aient des impacts non négligeables sur la dynamique des agents non-restreints. Car l'observation des simulations montre que ces derniers paraissent complètement indifférents à la présence des agents restreints.

Aussi, suite à ces interrogations, j'ai repris cette même analyse en augmentant le nombre de répétitions de 15 à 1000. Les 3 figures suivantes montrent les résultats :

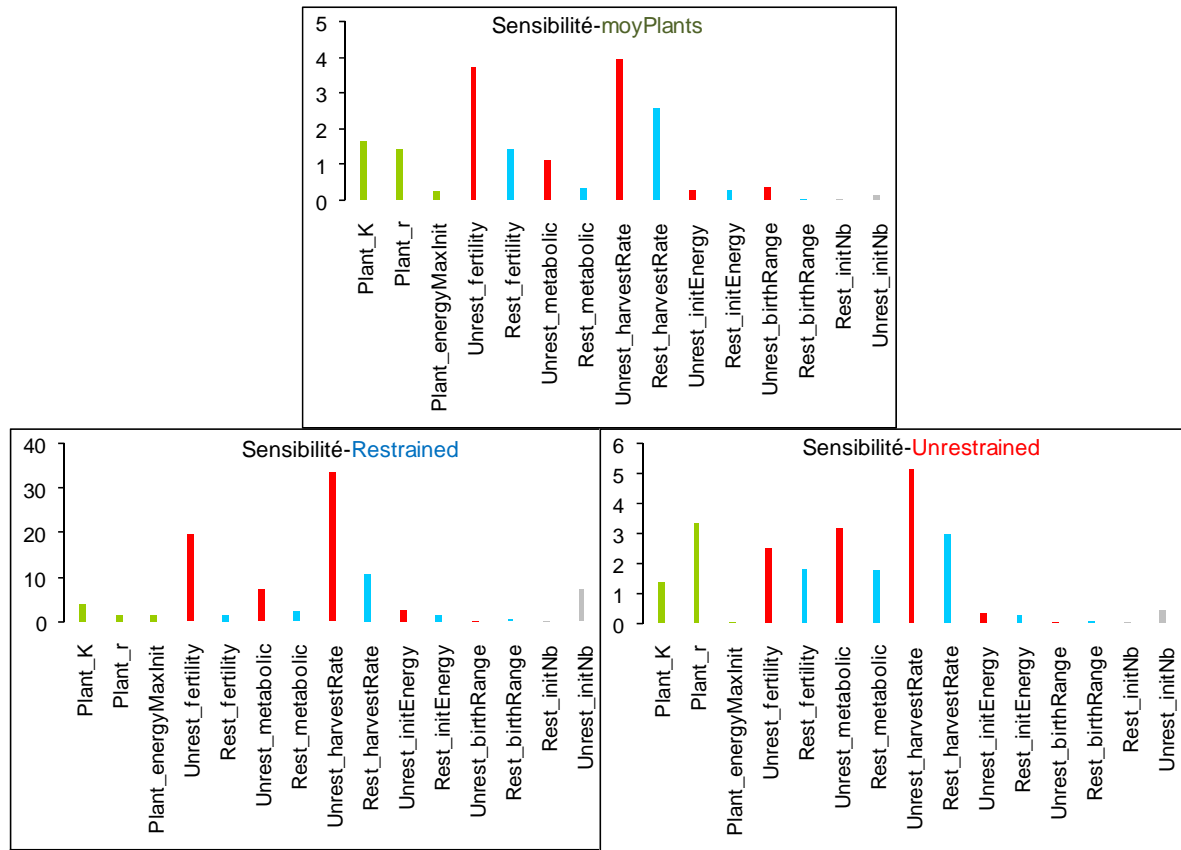


Figure 8-7 : Sensibilités locales pour 3 sorties du modèle : en haut, énergie moyenne dans l'environnement; à gauche, taille de la population des agents restreints; à droites, taille de la population des agents non-restreints. Par rapport à l'analyse précédente, le nombre de répétitions pour chaque paramètre étudié a été porté à 1000.

Si dans tous les cas, l'attribut "harvestRate" des non-restreints reste toujours le paramètre le plus marquant, on remarque des différences importantes avec la première série d'analyse. Dans cette nouvelle analyse, ce paramètre prédomine beaucoup plus qu'auparavant. Comme le montre la figure suivante (Sensibilité globale), c'est le facteur le plus important de ce modèle, quelle que soit la sortie que l'on observe. La sortie "Sensibilité_Restrained" (taille de la population des agents restreints) montre maintenant que les principaux facteurs qui affectent les agents restreints appartiennent tous à la classe Unrestrained. En d'autres termes, la survie des agents restreints dépend essentiellement des agents non-restreints. Par contre, pour ce qui concerne la sortie "Sensibilité_Unrestrained", la population des agents non-restreints est principalement affectée par les paramètres internes à cette classe et le taux de croissance des plantes. Mais, contrairement à ce qu'on observe sur les simulations, le rôle des agents restreints a une certaine influence dans la dynamique des agents non-restreints.

A partir de ces données, on peut estimer la sensibilité globale du modèle à chaque paramètre p_i sur toutes les sorties confondues (ici le niveau moyen d'énergie disponible, le nombre d'agents restreints et le nombre de non-restreints) en appliquant un analogue à la distance, plutôt qu'une moyenne qui a tendance à niveler les différences entre paramètres [Ginot et Monod, 2006] :

$$S_{i,tot} = \sqrt{\sum_j S_{i,j}^2} \quad (8.6)$$

Ce qui donne pour ECEC, l'histogramme suivant :

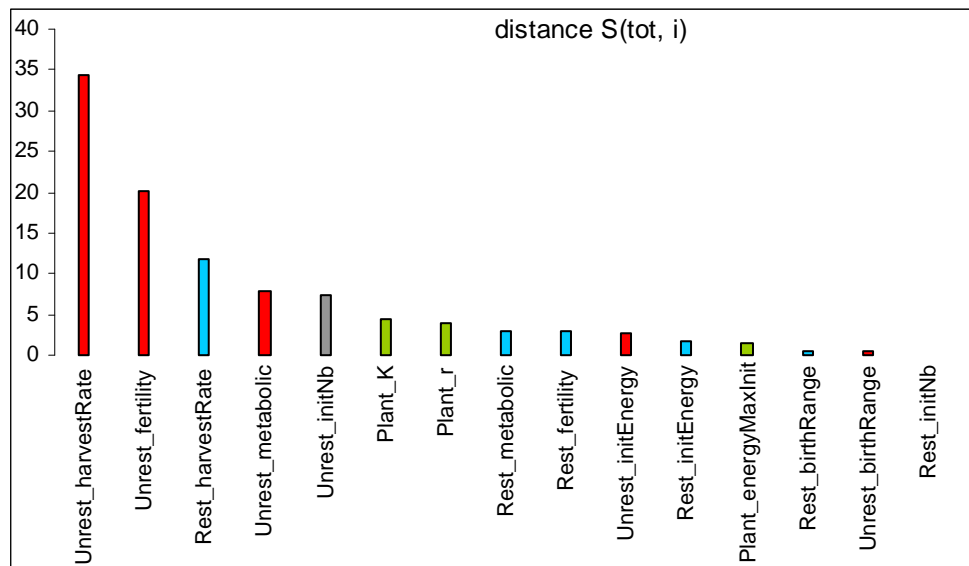


Figure 8-8 : Sensibilité globale du modèle par rapport à chaque paramètre (1000 répétitions)

Cette classification de la sensibilité des paramètres est bien différente de l'analyse précédente à 15 répétitions. Ainsi, en fonction du nombre et de la position des phénomènes stochastiques dans un modèle, l'aléatoire prend plus ou moins d'importance. On ne peut pas affirmer sans une étude préalable que 10 ou 15 répétitions sont suffisantes.

L'intérêt d'une telle analyse repose sur le fait qu'elle permet d'identifier et de hiérarchiser les paramètres les plus sensibles du modèle pour lesquelles il faudra porter une attention plus particulière, lors d'enquêtes par exemple.

Le deuxième intérêt est qu'elle réduit significativement le nombre de simulations à mener : il n'est pas nécessaire de croiser les paramètres, ni de les faire varier sur une gamme importante de valeurs. Les coûts en temps d'analyse et de manipulation sont réduits, avec pourtant des résultats intéressants, à condition de répéter suffisamment les expériences pour limiter l'effet des caractères aléatoires.

8.2.3.3 Signatures individuelles

La signature individuelle d'un paramètre permet de connaître son influence sur un indicateur. En fixant les autres paramètres à leur valeur de référence, on recueille les sorties du modèle en changeant la valeur du paramètre étudié pour chaque simulation. Pour ces études, il est préférable de choisir une gamme étendue de variation. On obtient ainsi un graphe montrant les valeurs des sorties en fonction des valeurs du paramètre dont la sensibilité est donnée par la pente de la courbe. Une droite parallèle à l'axe des x (le paramètre) indique une absence de sensibilité de l'indicateur à ce paramètre. Pour les modèles stochastiques, il faut répéter les simulations pour chaque valeur du paramètre étudié. Statistiquement, plus le pas d'incrément est faible, moins on a besoin d'un nombre élevé de répétitions. Ainsi, si on choisit 100 simulations, il est préférable de mener l'analyse sur 50 valeurs du paramètre en répétant seulement deux fois chaque valeur, plutôt que de faire l'inverse.

Pour optimiser encore la durée de l'analyse des modèles stochastiques, on peut aussi utiliser une variante des simulations de Monte Carlo. Plutôt que de faire varier chaque paramètre un par un, cette stratégie consiste à faire varier tous les paramètres simultanément. Pour chaque simulation, on tire aléatoirement une valeur sur leur gamme de variations.

8.2.3.4 Signatures individuelles appliquées au modèle ECEC

Cette étude a été menée sur tous les paramètres du modèle ECEC. Les sorties recueillies sont les tailles respectives des populations d'agents restreints et non-restreints. Mais contrairement à ce qui

est préconisé (valeur de la sonde en fin de simulation), j'ai relevé la moyenne de la taille des populations calculée après la première crise. En effet, les populations d'agents n'atteignent pas de situations d'équilibre mais leurs dynamiques entrent rapidement dans des cycles. Or, les phénomènes aléatoires liés au modèle décalent légèrement les oscillations. Les mesures prises au "pas de temps" 500 révèlent alors un bruit important lié à ces décalages des fluctuations.

Les sorties recueillies sont donc les moyennes des tailles des populations calculées sur l'intervalle [150; 500]. En effet, comme le montre la figure suivante, après une première crise, très critique pour les deux populations, les dynamiques des agents ayant survécus montrent des cycles assez réguliers. Il semble donc judicieux de calculer les tailles moyennes après cette première crise.

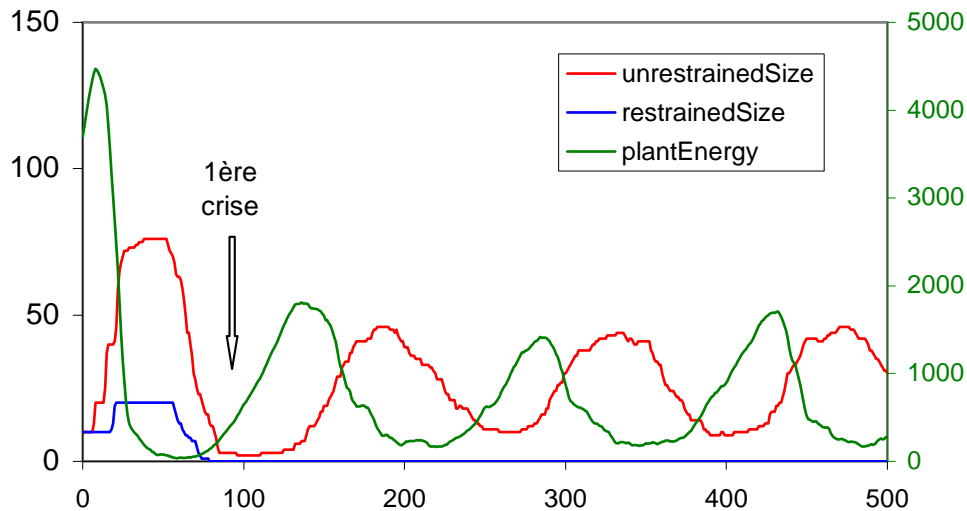


Figure 8-9 : Une simulation standard de ECEC. Après une première période de croissance, les deux populations rencontrent une première crise critique liée à l'appauvrissement de l'environnement. Très fréquemment, la population des restreints est éliminée à ce stade. Si la population des non-restreints parvient à survivre à cette première crise, ils ne sont plus éliminés après ce stade. La population rentre alors dans un cycle de fluctuations qui alterne avec les fluctuations de la dynamique de la végétation selon un schéma qui rappelle le modèle proie-prédateur de Lotka-Volterra.

Les résultats présentés sur les figures de la partie suivante ont été obtenus en exécutant 10000 simulations à partir d'un même état initial (une grille de 27x27 cellules et 10 agents dans chaque population placés aux mêmes endroits). Pour chaque simulation, une valeur d'un paramètre du modèle est tirée aléatoirement sur une gamme étendue. Les simulations sont répétées deux fois pour chaque valeur.

1.1.1.1.1 Signatures des paramètres "rayon de naissance"

Pour ce paramètre qui doit rester un entier, les valeurs de 1 à 10 ont été répétées 10 fois.



Figure 8-10 : Signatures du paramètre "rayon de naissance" des Restreints (graphe de gauche) et des Non-restreints (graphe de droite). Valeur de base : rayon de 2 cellules de prospection.

Ces signatures sous forme de droites horizontales signifient que pour une analyse OAT, ce paramètre n'a aucune influence sur la taille moyenne des populations (ce résultat est corroboré par l'analyse précédente "sensibilité globale", cf. Figure 8-8). Les points bleus en dehors des droites correspondent aux cas de simulations particulières où les agents non-restreints se sont effondrés d'eux-mêmes et pour lesquels les populations d'agents restreints ont pu se développer. Ces phénomènes rares (2%) sont indépendants du paramètre "rayon de naissance". Ce résultat est un exemple typique de cas où l'on peut simplifier un modèle en supprimant ce paramètre.

1.1.1.1.2 Signatures des paramètres r et K de la classe Plant

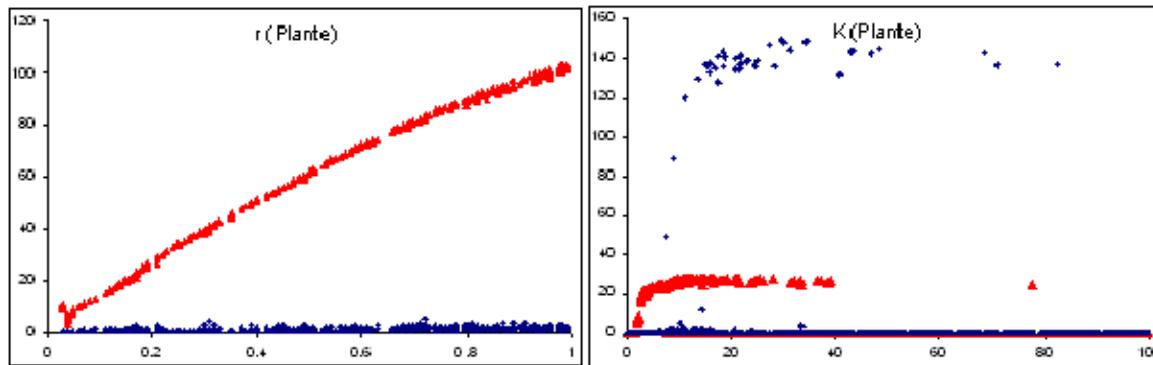


Figure 8-11 : Signatures des paramètres r et K de la classe Plant. Valeurs de base : $r = 0,2$ et $K = 10$.

En présence d'agents non-restreints, le taux de croissance r des plantes n'affecte pas la dynamique des agents restreints. Par contre, la taille de la population des non-restreints augmente quasi-linéairement avec r .

Les réponses des populations au paramètre K sont un peu plus compliquées :

- Pour K inférieur à 5, on observe une augmentation rapide des non-restreints et une exclusion systématique des restreints.
- Lorsque K est compris dans l'intervalle $[5; 40]$, la taille moyenne des non-restreints est stabilisée autour de 23 agents mais plus K tend vers la partie supérieure de cet intervalle et plus des disparitions des non-restreints sont fréquentes. Pour ces mêmes valeurs de K , les agents restreints sont régulièrement exclus, mais pour les rares cas où ils survivent, on observe une augmentation des tailles moyennes jusqu'à 140 agents.
- Au-delà de 40, les deux populations disparaissent pratiquement systématiquement.

Malgré des dynamiques de la végétation semblables en début de simulation (vitesse d'accroissement similaire en début de croissance puis ralentissement rapide pour les faibles valeurs de K), l'environnement atteint un niveau d'énergie au premier pic qui varie selon K (3000 pour $K=10$ et 6000 pour $K=40$). La hauteur de ce premier pic permet un accroissement rapide des populations. Lorsque ce pic est modérément élevé, la taille des populations reste modeste (65 agents non-restreints pour $K=10$). Mais si ce pic est élevé, la population s'accroît plus fortement (200 agents pour $K=40$). Dans ce cas, la première crise est toujours très violente et débouche sur une extinction des populations qui ont épuisé leur milieu.

1.1.1.1.3 Signatures des paramètres "taux métaboliques"

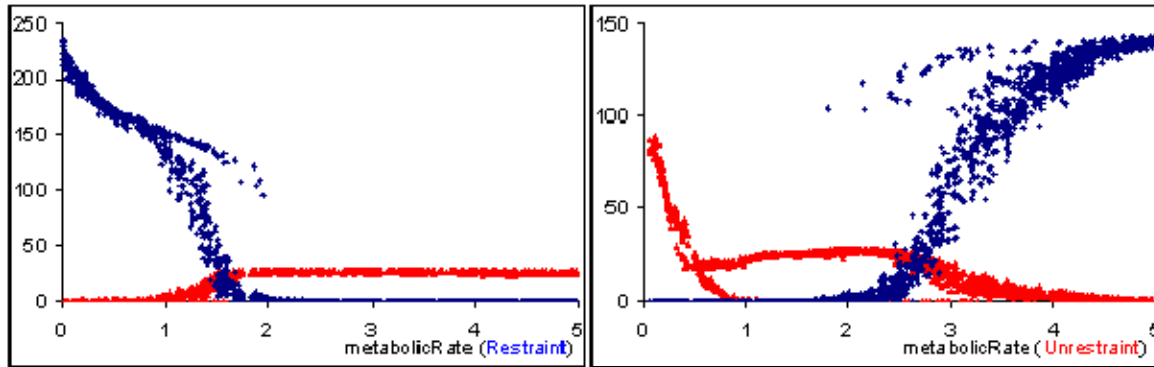


Figure 8-12 : Signatures du paramètre taux métaboliques des Restreints (graphe de gauche) et des Non-restreints (graphe de droite). Valeur de base : 2 unités d'énergie brûlées par pas de temps.

Ici aussi les réponses du modèle ne sont pas simples. Pour la classe *Restrained*, un taux métabolique supérieur à 2 (valeur de base) provoque l'exclusion systématique des agents restreints. Pour des valeurs inférieures à 2, ces agents deviennent compétitifs. Pour un taux autour de 1,5, les deux populations coexistent fréquemment. Plus ce taux est faible et plus la population des restreints est importante. Ils limitent alors les ressources pour les non-restreints qui se trouvent systématiquement exclus lorsque le taux est inférieur à 1.

On retrouve le même phénomène mais inversé pour le taux métabolique des non-restreints (graphe de droite) : plus leur taux est élevé, moins ils sont compétitifs et les agents restreints peuvent se développer. Par contre les réponses changent lorsque ce taux est inférieur à 2,5 : dans l'intervalle [1; 2,5], la taille moyenne de non-restreints reste stable (autour de 23 agents) et ils excluent systématiquement les agents restreints. Mais dans cet intervalle, on constate encore des phénomènes de double disparition des populations. Lorsque le taux métabolique des non-restreints est inférieur à 0,5, on ne constate plus aucune disparition. La taille moyenne de la population augmente fortement avec la diminution de ce taux.

1.1.1.1.4 Signatures des paramètres "seuil de fertilité"

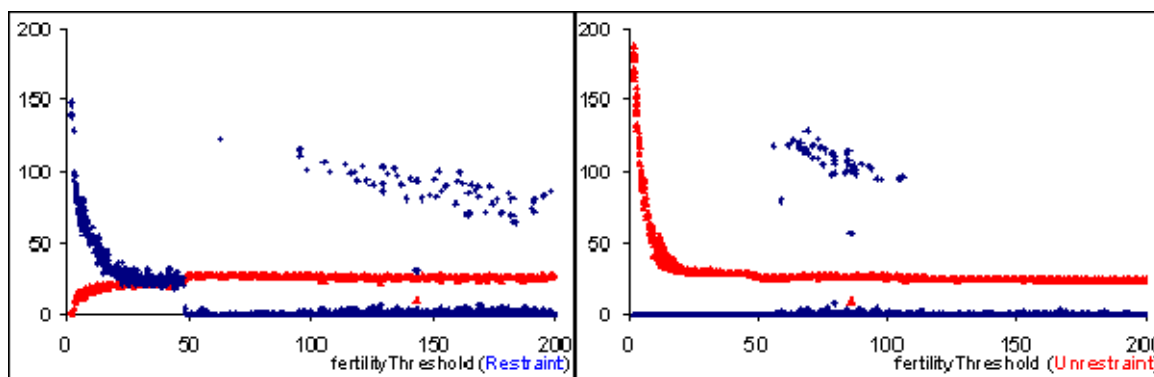


Figure 8-13 : Signatures du paramètre seuil de fertilité des Restreints (graphe de gauche) et des Non-restreints (graphe de droite). Valeur de base : 100 unités d'énergie pour pouvoir se reproduire.

La signature du seuil de fertilité de la classe *Restrained* montre deux phases très nettes. Au-dessus de 48, la population des restreints est exclue et n'influence pas les non-restreints. Pour des valeurs du seuil supérieures à 100, on observe néanmoins quelques rares cas de non-exclusion : les agents restreints ne consommant pas d'énergie pour se reproduire peuvent plus facilement survivre lorsque les populations des non-restreints se sont auto-effondrées (non visible sur le graphe). Mais cette situation stable change brutalement lorsque le seuil de fertilité devient inférieur à 48. Soudainement les agents restreints deviennent compétitifs en envahissant plus rapidement l'espace.

Plus le seuil de fertilité diminue à partir de cette valeur, et plus leur population augmente et plus ils mettent en difficulté les agents non-restreints. Cette inversion brutale des tendances est assez spectaculaire pour un modèle aussi simple et montre un basculement des dynamiques autour d'une valeur insoupçonnée.

Le seuil de fertilité des agents non-restreints semble influencer très peu les populations des restreints qui restent exclus quelle que soit sa valeur. Pour les agents non-restreints, cette signature ressemble à une hyperbole: en dessous de 25, la population des non-restreints augmente très fortement, et au-dessus de 25, elle reste stable aux alentours de 23 agents en moyenne. Néanmoins, pour des valeurs du seuil de fertilité comprises entre 55 et 105, on remarque quelques cas d'élimination des agents non-restreints qui laisse alors la place aux agents restreints. En dehors de cet intervalle, aucune extinction des non-restreints n'est constatée. Cette zone de faible exclusion de restreints peut s'expliquer par le fait qu'elle constitue une zone de transition entre, d'un côté un seuil de fertilité très élevé qui empêche des reproductions précoces (après la première grande crise) et de l'autre côté, un seuil bas qui favorise la reproduction rapide par des agents ayant peu d'énergie de réserve.

Ici encore, ces signatures dévoilent des résultats étonnants que l'on pouvait difficilement anticiper.

1.1.1.1.5 Signatures des paramètres "taux de prélèvement"

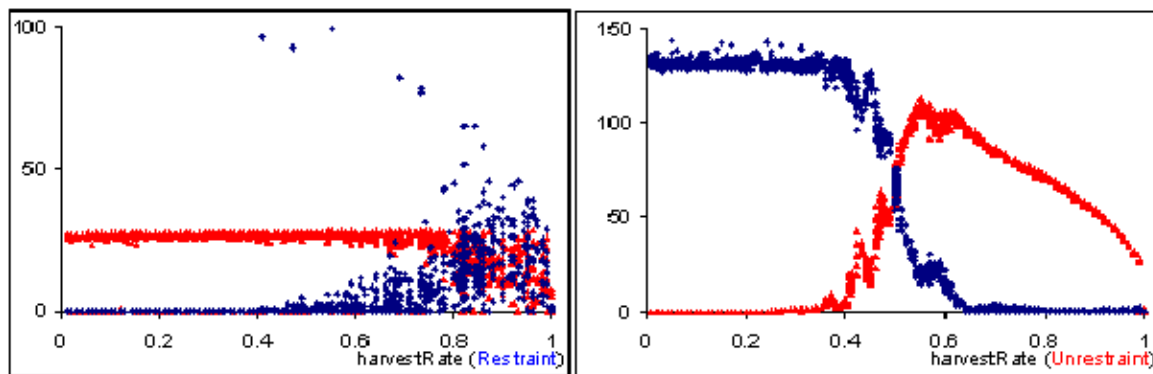


Figure 8-14 : Signatures du paramètre taux de prélèvement des Restreints (graphe de gauche) et des Non-restreints (graphe de droite). Valeurs de base : 50% de l'énergie disponible pour les Restreints et 99% pour les Non-restreints.

Plus le taux de prélèvement des restreints (fixé initialement à 50 %) s'approche de celui des agents non-restreints et plus le conflit entre les deux populations s'intensifie avec l'équilibre des forces. Pour un taux de prélèvement compris entre 0 et 80%, les agents restreints n'affectent pas les agents non-restreints dont la population reste stable (autour de 23 agents en moyenne, avec quelques cas d'extinctions). Au-delà de 80% de prélèvement, les populations d'agents restreints survivent mieux au détriment des non-restreints dont les tailles de populations tendent à diminuer. Pour ces valeurs élevées de taux de prélèvement, on remarque une grande variance.

L'analyse du taux de prélèvement des agents non-restreints (fixé initialement à 99 %) dévoile une signature attendue pour les populations restreintes : au-dessus de 62 %, ce taux entraîne l'exclusion systématique des restreints. En dessous de 38%, les agents "non-restreints" limitent encore plus leurs prélèvements que les restreints. Ils se trouvent ainsi exclus au détriment des restreints qui voient leur population plafonnée à 132 agents. Autour des taux de prélèvement de la population des restreints (50%), les deux populations coexistent, sans aucune exclusion. Mais pour les populations non-restreintes, la signature de ce paramètre est plus originale. Pour des valeurs supérieures à 40%, la taille des populations des non-restreints augmente. Mais à partir d'un taux maximum de prélèvement de 56%, la taille de cette population diminue progressivement avec ce paramètre. Par rapport à une population d'agents restreint (taux de 50%), il est donc préférable pour les non-restreints d'avoir un taux de prélèvement juste supérieur (entre 53% et 65%). Car des taux plus élevés diminuent la taille de leur population. A tel point que pour de très hauts taux

comme la valeur de base (99%), elle peut s'effondrer d'elle-même (les seuls cas d'élimination des deux populations se situent pour ces valeurs très élevées).

8.2.3.5 Sensibilités locales temporelles : fonctions de sensibilité

Une autre analyse locale consiste à observer la sensibilité du modèle aux paramètres, non pas en fin de simulation comme on l'a fait jusqu'à présent mais au fil du temps. Elle permet de déterminer si un paramètre s'exprime davantage à un moment donné de la simulation plutôt qu'à un autre. On appelle ces sensibilités locales temporelles les *fonctions de sensibilité* des paramètres. Comme le souligne [Ginot et al., 2006], ces analyses temporelles peuvent être très utiles pour mesurer précisément des caractéristiques sur le terrain : connaissant les intervalles de temps pendant lesquels un caractère s'exprime plus fortement, on peut a posteriori utiliser les fonctions de sensibilité pour optimiser ces prises de mesure.

Pour calculer cette fonction de sensibilité, il faut utiliser la formule de sensibilité normalisée (8.5) décrite au paragraphe 8.2.3.1 (sensibilités locales) à chaque "pas de temps" :

$$S_{i,j} = \frac{\ln \overline{M_j} - \ln \overline{M_{j_b}}}{\ln p_i - \ln p_{ib}} \quad 8.5$$

Pour l'appliquer au modèle ECEC, 1000 répétitions des simulations ont été exécutées sur ses paramètres standards pour obtenir une simulation témoin moyenne. Puis, pour chaque paramètre que l'on modifie de 5%, 1000 simulations sont répétées. Après chaque série de simulations, on applique la formule de sensibilité normalisée que l'on calcule pour chaque "pas de temps" : la valeur d'une variable M_j au temps t est moyennée sur les 1000 répétitions⁷⁹ et est comparée à la valeur moyennée $\overline{M_{j_b}}$ des simulations témoins au même "pas de temps". la sensibilité locale de la sortie j pour le paramètre p_i ,

Les figures suivantes montrent les fonctions de sensibilité pour certains paramètres sur les sorties "taille de population" des agents restreints et non-restreints. Pour des soucis de lisibilité, les indices de sensibilité ont été transformés en valeur absolue. Par ailleurs, étant donné qu'un indice inférieur à 1 signifie l'absence de sensibilité, les fonctions dont les valeurs restent inférieures à 1, ne sont pas présentées.

⁷⁹ Plus concrètement, il faut stocker toutes les valeurs M_j à t , pour chaque simulation et calculer la moyenne $\overline{M_j(t)}$ sur les 1000 répétitions. Bien sûr, à chaque pas de temps on obtiendra un $\overline{M_j(t)}$ différent.

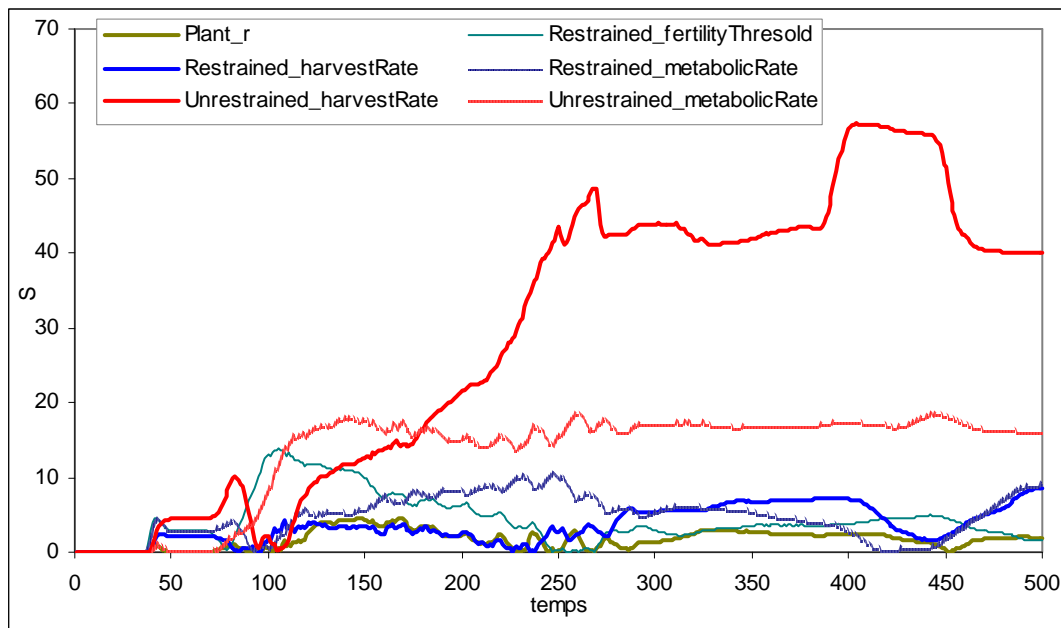


Figure 8-15 : Fonctions de sensibilité des paramètres les plus importants pour la taille de la population des agents restreints.

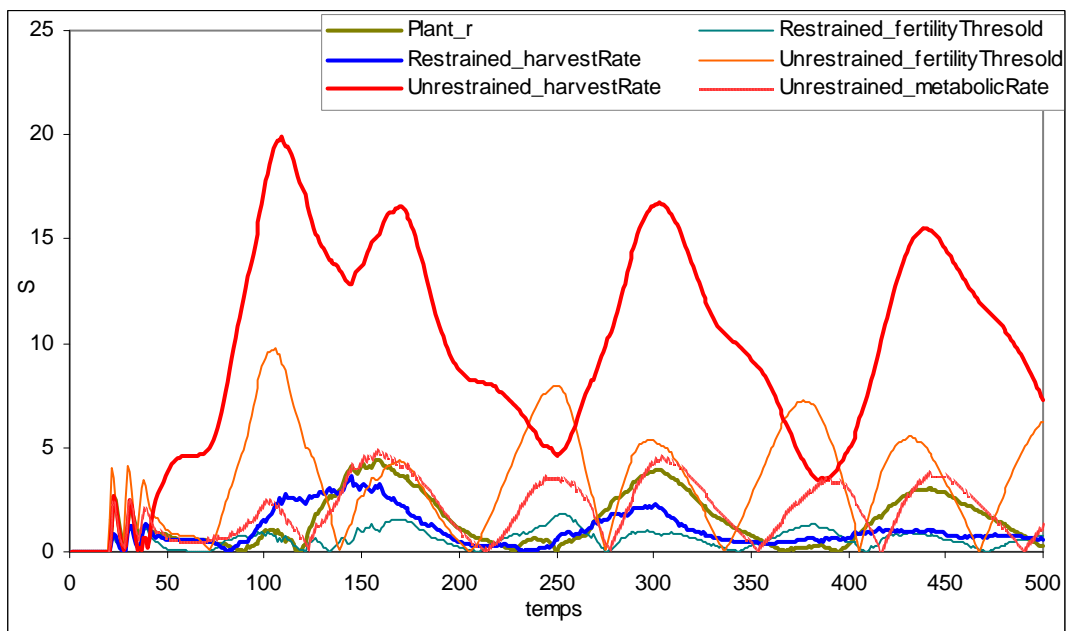


Figure 8-16 : Fonctions de sensibilité des paramètres les plus importants pour la taille de la population des agents non-restreints.

Pour les deux catégories d'agents, on remarque une prédominance du paramètre "taux de prélèvement" des non-restreints, avec des fluctuations de ses impacts sur la taille des deux populations. La population des non-restreints (graphe inférieur) n'est sensible qu'à ses propres paramètres (taux de prélèvement et seuil de fertilité). Dans une moindre mesure, les facteurs croissance r des plantes et "taux de prélèvement" des agents restreints ont une influence non négligeable sur la taille de cette population.

Pour la toute première partie du graphe, zone pendant laquelle aucune reproduction n'est constatée, les sensibilités de tous les paramètres sont nulles; seuls les paramètres "nombre initial d'agents" (non présentés ici) valent 1 : les tailles de populations sont évidemment sensibles à ces paramètres tant qu'il n'y a pas eu de reproduction. Au-delà de cette première zone, les sensibilités à ces deux paramètres décroissent.

La population des agents restreints (graphe supérieur) est évidemment sensible aux paramètres des non-restreints (taux de prélèvement et taux métabolique) mais lors de la première crise (entre le "pas de temps" 75 et 150), des modifications de son seuil de fertilité peuvent influencer sa dynamique. Cependant on constate pour ce graphe une très grande sensibilité de la taille des populations des restreints aux paramètres "taux de prélèvement" et "taux métabolique" à partir du pas de temps 150 et pour toute la suite de la simulation. Ce résultat est étonnant quand on sait que pour la plupart des simulations, les agents restreints sont déjà exclus. Mais l'explication est simple. Si on constate dans la majorité des cas une exclusion des agents restreints, quelques rares simulations laissent voir des disparitions des non-restreints et la survie miraculeuse d'agents restreints. La comparaison d'une simulation témoin moyennée (la valeur d'une variable au temps t est moyennée sur les 1000 répétitions) avec une simulation moyennée pour laquelle le taux de prélèvement des non restreints a été modifié permet de constater ces différences (figure suivante) :

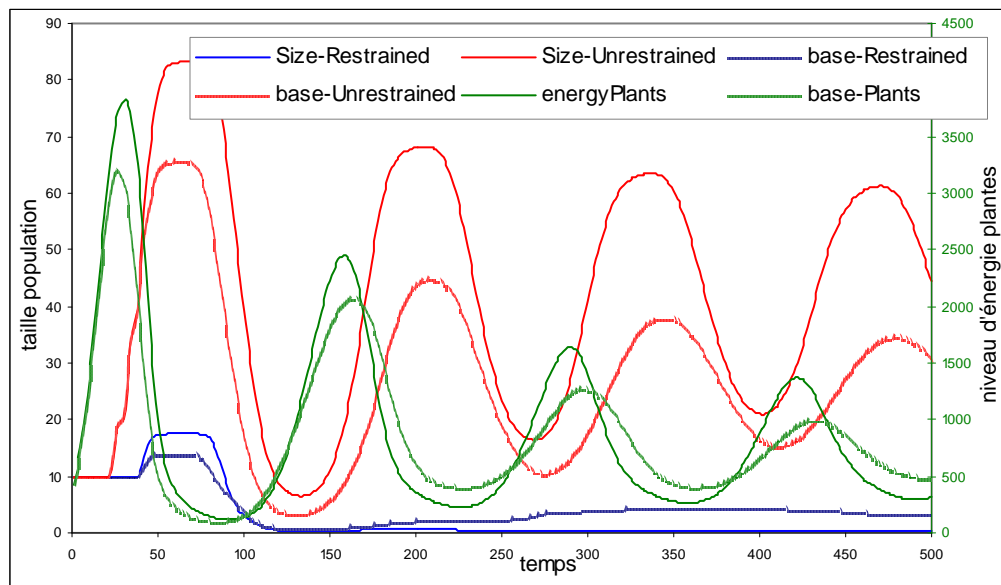


Figure 8-17 : Dynamiques de "énergie totale" des plantes et "taille des populations" d'agents restreints et non-restreints moyennées sur 1000 répétitions. On compare la simulation témoin moyennée (traits pointillés) et la simulation moyennée après modification de 5% du taux de prélèvement des agents non-restreints (traits continus).

A partir du "pas de temps" 150, la taille des populations d'agents restreints laisse apercevoir un écart entre les simulations de base et celles avec modification du paramètre taux de prélèvement. Or, comme l'a montrée la signature de ce paramètre (page 188), dès que le taux de prélèvement des non-restreints s'éloigne de sa valeur de base (0,99), plus aucune extinction de ces agents n'est constatée. Les agents restreints n'ont alors quasiment aucune chance de survivre. Par exemple, au "pas de temps" 410, la sortie j de la taille des restreints donne :

$$\bar{M}_j = 0,2175 \text{ et } \bar{M}_{j_b} = 4,0926 \text{ pour } p_i = 0,9405 \text{ et } p_{ib} = 0,99.$$

Malgré ce faible écart, la sensibilité S des restreints à ce paramètre est pourtant très élevée ($S=57,2$ au "pas de temps" 410). Ceci s'explique par la formule 8.5 que nous utilisons : la division par la différence entre paramètres (0,051) amplifie cet écart. Et ni la formule (8.1), ni celle proposée par Jolicoeur [2002]⁸⁰, ni le pourcentage de variation ne suppriment cet effet d'explosion de la

⁸⁰ L'auteur propose un indice de sensibilité calculé de la façon suivante :

$$IS = \frac{\frac{M_2 - M_b}{P_2 - P_b}}{P_{moy}} \text{ où } M_b \text{ est la sortie du modèle pour le paramètre de base } P_b, \text{ et } M_{moy} \text{ est la moyenne des sorties } M_2 \text{ (pour le paramètre } P_2) \text{ et } M_b.$$

sensibilité à ce paramètre. Dans le cas de ECEC, l'étude de la fonction (8.5) ne paraît donc pas très intéressante.

Bien que le résultat soit décevant pour cet exemple, l'étude des fonctions de sensibilité est très importante pour l'utilisateur d'un modèle. Elle nous renseigne sur le niveau de précision de chaque paramètre et sur l'attention qu'on doit leur accorder sur le terrain ou au laboratoire; elle permet "de localiser les instants où le modèle est particulièrement sensible à un paramètre" [Ginot et al., 2006]. D'autre part, en effectuant des calculs de corrélation entre fonctions de sensibilité, on peut déterminer les paramètres qui font l'objet d'une surparamétrisation : "détecter une surparamétrisation est important car elle signifie que deux paramètres, ou des combinaisons de paramètres, ont la même action sur le modèle et que ce dernier pourrait probablement être écrit plus simplement. [...] Il est donc utile de dresser le tableau des corrélations entre fonctions de sensibilité" [ibid.].

8.2.4 Sensibilité globale

Si la sensibilité locale permet d'estimer l'impact de chaque paramètre pris un à un sur les résultats des simulations, la sensibilité globale vise plutôt à parcourir l'ensemble de l'espace paramétrique pour étudier les interactions entre paramètres. Car, pour les modèles à réponses non-linéaires, la sensibilité à un paramètre peut être accrue en fonction de la valeur des autres paramètres. Ces analyses sont donc complémentaires des méthodes locales décrites précédemment.

8.2.4.1 Plans d'expérience

Pour mener à bien ces plans d'expérience [Amblard, 2003], trois techniques principales sont largement utilisées : les plans factoriels, complets et fractionnaires et les plans d'expériences par échantillonnage aléatoire. Les plans factoriels consistent pour chacun des paramètres (appelé facteur de variation) à définir les niveaux que l'on souhaite étudier (ces niveaux correspondent en général à un découpage discret facilité par l'observation des signatures individuelles), puis à réaliser les expériences définies par la combinaison de ces niveaux. On peut alors choisir un plan complet qui croise toutes les combinaisons possibles ou un plan fractionnaire en combinant tous les paramètres pris deux à deux (voire 3 à 3 ou plus encore selon le degré d'interaction que l'on cherche à observer). Bien sûr, dès que le nombre de paramètre augmente un peu, un plan complet devient rapidement impossible et il faut se tourner vers un plan fractionnaire.

Le dernier type de plans d'expériences, l'échantillonnage aléatoire, dérive des méthodes de type Monte Carlo et consiste à tirer aléatoirement et simultanément des valeurs des paramètres. Pour ne pas courir le risque d'avoir des zones non-explorées, on peut au préalable découper l'espace des paramètres en niveaux appelés hyper-cubes latins : l'étendue de chacun des facteurs est divisée en N niveaux de probabilités égales, et T tirages aléatoires sont réalisés pour chacun des facteurs dans chacun des niveaux. On génère un grand nombre (T) de cycles pour explorer suffisamment de combinaisons. "Nous obtenons ainsi progressivement une « image » de la réponse dans l'espace des paramètres" [ibid.].

8.2.4.2 Estimation des interactions

Pour tester si un facteur entraîne ou non une réponse du modèle et pour estimer cette réponse croisée des paramètres, plusieurs techniques sont possibles. Après avoir inventorié et expérimenté quelques unes des méthodes les plus connues (méthode de Sobol, décomposition des séries temporelles de Fourier FAST), [Ginot et Monod, 2006] préconisent d'utiliser l'analyse de variance (le carré des écarts par rapport à la moyenne). En effet, l'ANOVA (pour ANalysis Of VAriance) permet d'étudier les différences de moyennes entre populations. Dans le cas d'analyse de sensibilité, on peut utiliser l'ANOVA en considérant que les données issues de simulations différentes forment des populations distinctes. On cherche alors à savoir si ces données sont significativement différentes. Par rapport aux autres méthodes, les auteurs expliquent que

l'ANOVA est moins coûteuse en nombre de simulations (100 fois moins) et plus facile à traiter. Or les résultats qu'ils tirent de leurs comparaisons de méthodes d'analyse plus standards sont extrêmement proches : "si les conditions d'utilisation sont respectées, ces trois méthodes sont équivalentes pour ces critères d'effets principaux et totaux" [ibid.]. De plus, l'ANOVA permet de traiter les modèles stochastiques, mais aussi de quantifier précisément les interactions et de savoir si l'effet d'un facteur est linéaire ou polynomial. "Avec tant d'avantages, l'ANOVA mériterait d'être plus utilisée dans le contexte de l'analyse de sensibilité globale" [ibid.].

Cependant, pour utiliser correctement une ANOVA, [Ginot et al., 2006] soulignent qu'il est nécessaire au préalable d'avoir étudié la signature des paramètres. En effet, pour déterminer le nombre de niveaux à prendre en compte pour chaque paramètre, il faut étudier la réponse de chacun d'eux. Ainsi, si la signature d'un paramètre est sensiblement linéaire, on peut se limiter à tester seulement deux valeurs distantes pour ce paramètre. Si sa signature suit plutôt une croissance exponentielle, il sera préférable de le transformer en logarithme par exemple pour considérer une réponse linéaire après cette transformation; à nouveau, il suffira de deux valeurs extrêmes pour l'analyse. Mais si la signature est plus complexe, alors il est nécessaire d'augmenter les valeurs à prendre en compte pour l'analyse. Ainsi pour trois niveaux, les réponses ne sont pas nécessairement alignées et il faut les ajuster par un polynôme d'ordre 2.

Une ANOVA permet donc de tester la sensibilité d'un indicateur à plusieurs paramètres qui s'influenceraient mutuellement. Elle permet de quantifier cette réponse par le carré des écarts par rapport à la moyenne totale. Elle permet également de tester les interactions entre paramètres, c'est-à-dire de savoir si la réponse du modèle pour des valeurs conjointes de deux paramètres, est différente de la simple somme des réponses de chaque paramètre pris individuellement (effet de A et B par rapport à la moyenne, égal ou non à effet moyen de A + effet moyen de B). On cherche alors à répartir la variance $V(M_s)$ de la variable de sortie s selon la variance de chacune des entrées P_1, \dots, P_n en prenant en compte les interactions entre les variables tel que :

$$V(M_s) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n V_{i,j} + \dots + V_{1,2,\dots,n}$$

où V_i est la contribution du paramètre P_i à $V(M_s)$ et où $V_{i,j}$ représente l'interaction des paramètres P_i et P_j :

$$V_{i,j} = V(M|P_i, P_j) - V_i - V_j$$

L'indice de sensibilité d'un paramètre P_i s'écrit alors : $S_i = \frac{V_i}{V}$ et l'interaction entre deux paramètres

P_i et P_j s'écrit $S_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{V}$.

L'indice de sensibilité totale du paramètre P_1 se décompose ainsi :

$$ST_{P_1} = \underbrace{S_{P_1}}_{\text{Effet principal de } P_1} + \underbrace{S_{P_1, P_2} + \dots + S_{P_1, P_n}}_{\text{interaction d'ordre 2 entre } P_1 \text{ et les autres facteurs}} + \dots + \underbrace{S_{P_1, P_2, \dots, P_n}}_{\text{interaction d'ordre } n}$$

8.2.4.3 ANOVA appliquée au modèle ECEC

L'application de l'ANOVA dans le cas d'une analyse de sensibilité globale permet d'évaluer la contribution de chaque paramètre sur la variance générale d'un indicateur, c'est à dire la somme

des carrés des écarts entre chaque simulation et la moyenne globale des simulations. Pour mener cette analyse, on assigne à chaque paramètre un nombre limité de valeurs (les niveaux du paramètre). Etant donné la souplesse qu'offre l'ANOVA, le nombre de niveaux par paramètre n'est pas nécessairement identique. [Ginot et Monod, 2006] conseillent de fixer ce nombre à 2 niveaux pour la plupart des facteurs sauf si leur signature individuelle n'est clairement pas linéaire dans le domaine de variation dit acceptable.

Pour ECEC, le tableau ci-dessous présente les paramètres qui ont été choisis pour cette analyse et les niveaux qui ont été choisis en fonction des signatures (cf. graphiques des signatures individuelles).

Tableau 2 : Paramètres de ECEC retenus pour l'analyse globale et leurs niveaux

Paramètre	Range	Valeur référence	Niveaux de l'ANOVA
r (Plante)	0,1 – 0,4	0,2	0,1 ; 0,4
K (Plante)	10 - 40	10	10 ; 40
metabolicRate (UnRestrained)	1 - 4	2	1,5 ; 2,5 ; 3,5
metabolicRate (Restrained)	1 – 4	2	1 ; 2 ; 3
fertilityThreshold (UnRestrained)	50 - 150	100	50 ; 150
fertilityThreshold (Restrained)	50 - 150	100	50 ; 150
HarvestRate (Restrained)	0,35 – 0,55	0,5	0,35 ; 0,55
HarvestRate (UnRestrained)	0,6 – 0,99	0,99	0,6 ; 0,99

Les signatures des paramètres « metabolicRate » sont irrégulières autour de leur valeur de référence, j'ai donc augmenté leurs niveaux. Ce qui donne 6 paramètres à 2 niveaux et 2 paramètre à 3 niveaux = $2^6 \times 3^2 = 576$ combinaisons possibles. Chaque combinaison est répétée 10 fois ce qui donne = 5760 simulations.

Pour chaque jeu de valeurs des paramètres, 10 simulations sont menées et pour chacune, on calcule la taille moyenne de chaque population de ruminants entre le pas de temps 150 et 500 (pour éviter les bruits liés aux conditions initiales et la 1^{ère} crise violente).

Pour faire l'analyse, on regroupe tous les résultats des simulations par valeur de paramètre (18 regroupements dans ce cas, $6 \times 2 + 3 \times 2$). Chaque regroupement est alors considéré comme une « population ». On cherche alors à savoir si la variance inter-groupe est plus importante que la variance intra-groupe (encore appelée résidu) :

$$F = \text{variance inter-groupes} / \text{variance intra-groupes}$$

La valeur de ce rapport est comparée à celle d'une table de Fisher-Snedecor, table à double entrée avec pour numérateur le nombre de groupes (ou de populations) k moins un, (soit $k-1=17$) et pour dénominateur le nombre total de mesures – k (soit $kn-k \approx 5700$).

Somme des carrés des écarts (SCE) se calcule ainsi :

$$SCE_intergroupe = \sum_i^k (\overline{m_i} - \overline{\overline{M}})^2 \cdot n \text{ et } SCE_intragroupe = \sum_i^k \sum_j^n (x_{i,j} - \overline{m_i})^2$$

Les résultats pour cette analyse donnent :

Variance inter-groupes = SCE inter-groupes/(k-1) = 249,7

Variance intra-groupes = SCE intra-groupes/(kn-k) = 3406,5

Et le calcul de $F = \text{Variance inter-groupes} / \text{Variance intra-groupes} = 0,073$

La valeur du F est largement inférieure à la valeur de Snedecor (1,63) au seuil de signification 5%. On en déduit qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes. Pour cette série de mesures, on peut conclure que les tailles des ruminants des 18 groupes ne diffèrent pas significativement et donc que l'analyse des paramètres pris un par un est suffisante.

8.3 ANALYSE DES CONFIGURATIONS INITIALES

Les analyses menées précédemment ont consisté à essayer de comprendre l'impact des paramètres du modèle sur ses sorties. Pour cela, les simulations ont été menées en partant à chaque fois d'un état initial identique. Il nous faut maintenant estimer quels rôles jouent les configurations initiales sur le comportement du modèle. Car, cette phase d'initialisation influence souvent les résultats.

8.3.1 Niveau initial d'énergie des plantes du modèle ECEC

On a vu précédemment que le nombre initial d'agents dans ECEC n'affectait pas beaucoup les résultats des simulations. Il suffit d'un seul agent non-restreint au départ, pour bouleverser la dynamique des agents restreints et les conduire à terme à leur exclusion.

On s'intéresse maintenant au niveau d'énergie initialement présent dans l'environnement. Habituellement, pour initier ECEC, le simulateur charge un fichier de données qui permet d'instancier la grille spatiale sur laquelle sont ensuite placés les agents. Pour analyser l'impact de l'énergie initiale affectée à chaque cellule, il a fallu modifier légèrement le simulateur et déterminer un nouveau paramètre appelé "energyMaxInit". Lors de l'initialisation, une valeur dans l'intervalle]0 ; energyMaxInit] est alors tirée aléatoirement. Le graphe suivant montre les résultats sur les populations d'agents qu'entraînent des variations du niveau maximum d'énergie initialement attribué à chaque plante (de 1 à 40) :

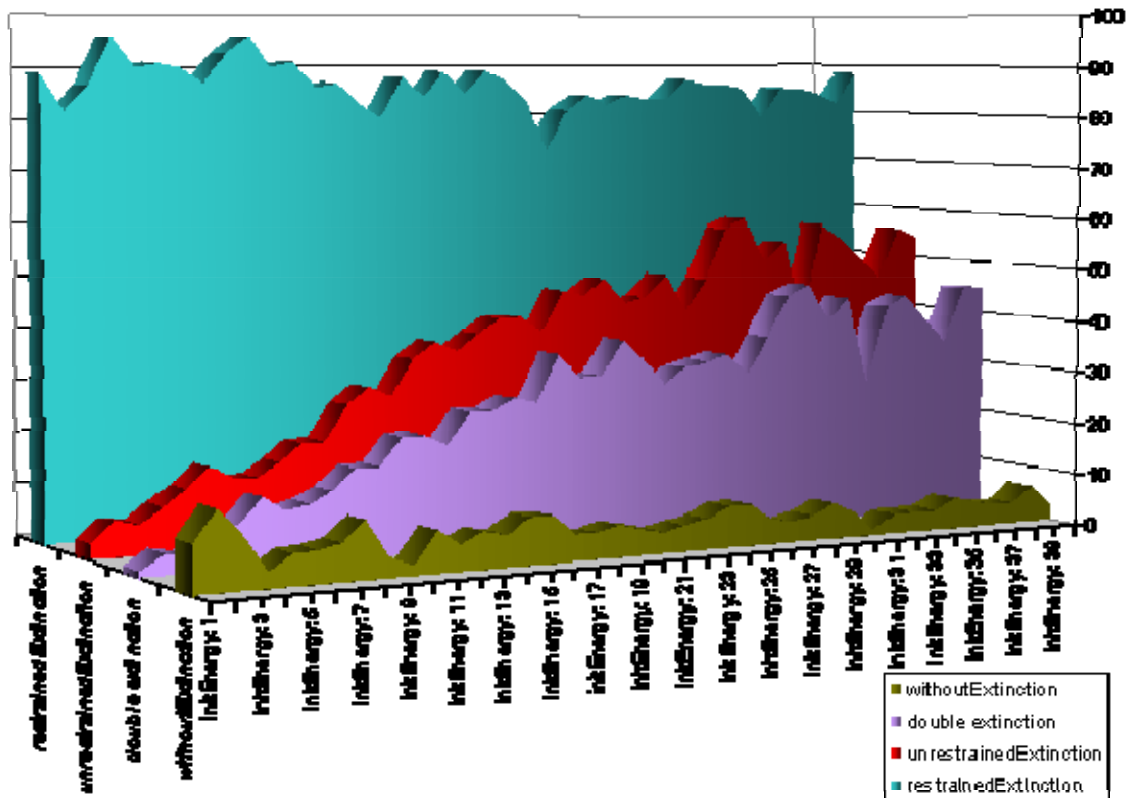


Figure 8-18 : Analyse des configurations initiales de ECEC : nombre d'extinctions des populations d'agents en fonction du niveau maximum d'énergie initialement attribué à chaque plante (de 1 à 40). Les données sont calculées pour 100 répétitions des simulations pour chaque valeur du paramètre. Contrairement à ce qu'on pourrait attendre, le nombre d'extinctions augmente avec le niveau initial d'énergie.

A nouveau, nous obtenons un résultat contre-intuitif : contrairement à ce qu'on pourrait attendre, un enrichissement de l'environnement augmente les probabilités d'extinction des populations. Plus l'énergie initiale affectée aux cellules est élevée et moins les populations ont de chances de survivre. En effet, un faible niveau d'énergie initiale limite la croissance rapide des agents. Devenant moins nombreux, ils ne nettoient pas complètement leur milieu. Cette limitation de l'environnement permet d'éviter la première crise et l'effondrement des populations.

L'enquête que je proposais de mener au début de ce chapitre est résolue : il ne s'agissait pas d'un défaut de codage mais juste d'une modification de l'état initial de l'espace. En voulant prolonger la survie des populations, nous avons certainement modifié l'environnement en enrichissant l'énergie initialement affectée aux plantes. Or, statistiquement, les réponses du modèle sont à l'opposé de ce qu'on attendait.

8.3.2 Fragmentation de l'espace

Comme on l'a vu au chapitre 4.3.1 (Complexité selon Von Neumann), changer la structure initiale de l'espace en une répartition hétérogène des plantes par paquets (ou patches), modifie considérablement la réponse du modèle. Avec un tel état fragmenté, les agents restreints survivent quand la population des non-restreints disparaît. En effet, tout agent éprouve des difficultés à trouver les patches éparpillés. Mais ceux qui sont découverts par les restreints sont maintenus à un niveau de production suffisant, alors que ceux qui sont découverts par les non-restreints sont rapidement coupés à blanc et ne produisent plus assez pour la survie de leurs hôtes qui cherchent alors d'autres patches aléatoirement. On peut donc s'intéresser au niveau de fragmentation à partir duquel les processus d'exclusion s'inversent.

A partir d'un même nombre de cellules avec plantes, j'ai donc cherché à connaître comment jouait la taille des patches et la distance qui les sépare. Il a fallu rajouter un algorithme capable de créer un environnement en spécifiant la taille et la distance entre les patches. Dans l'analyse qui suit et afin de pouvoir comparer les résultats, le nombre de cellules avec plantes reste inchangé pour toutes les configurations de l'espace : 900 cellules actives (30x30), que l'on réparties par patches de dimensions variables. Le tableau qui suit présente les configurations spatiales testées et la figure ci-dessous montre trois exemples de configurations.

Tableau 3 : taille de la grille initiale en fonction du nombre de patches et de la distance les séparant (l'unité est la cellule).

Largeur d'un patch	Taille d'un patch	Nombre de patches	Distance entre patches	Taille de la grille (toroïdale)
1	1	900	1 à 10	60x60 à 330x330
2	4	225	1 à 10	45x45 à 180x180
3	9	100	1 à 10	40x40 à 130x130
5	25	36	1 à 10	36x36 à 90x90
6	36	25	1 à 10	35x35 à 80x80
10	100	9	1 à 10	33x33 à 60x60
15	225	4	1 à 10	32x32 à 50x50
30	900	1	1 à 10	31x31 à 40x40

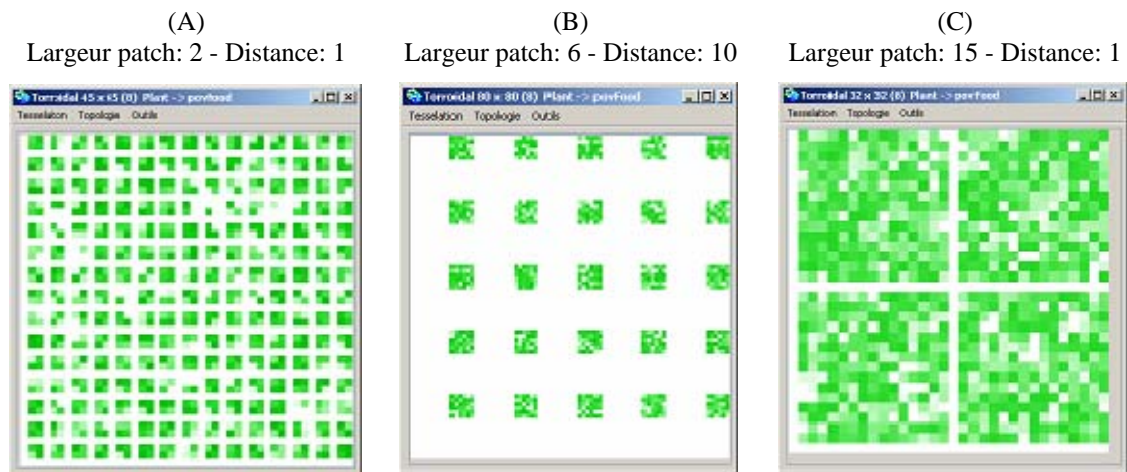


Figure 8-19 : Trois exemples de configurations spatiales contenant 900 cellules plantes :

- (A) 225 patches de 2 cellules de côtés, séparés par une cellule (grille de 45x45).
- (B) 25 patches de 6 cellules de côtés, séparés par 10 cellules (grille de 80x80).
- (C) 4 patches de 15 cellules de côtés, séparés par une cellule (grille de 32x32).

Pour mesurer l'effet de la fragmentation du paysage, deux indicateurs ont été choisis. Le premier donne la taille de chaque population en fin de simulation et l'autre indique la date d'exclusion des agents. En effet, certaines configurations semblent admettre une coexistence des deux populations. Mais si on fait tourner les simulations sur des durées plus longues que celles utilisées habituellement, on s'aperçoit dans certains cas d'un lent déclin qui aboutit à l'élimination d'une des espèces. Ne pouvant faire tourner sur des durées infinies, les simulations ont été bornées à 4000 "pas de temps". Au-delà de cette durée, on considère les populations encore présentes comme adaptée à la configuration spatiale. Aussi, sur les graphiques qui suivent, une date d'exclusion égale à 4000 signifie en fait une absence de disparition de la population concernée. Pour chaque valeur des paramètres (largeur d'un patch et distance de séparation), 20 simulations ont été répliquées (voir graphes suivants).

Par soucis de clarté, les écart-types des moyennes ne sont pas indiqués mais dans certaines situations, j'ai constaté une grande variabilité des réponses. Voici quelques rapides commentaires sur ces résultats :

Pour des patchs inférieurs à 3 cellules de côté, on constate une élimination de toutes les populations lorsque les distances qui séparent les patchs augmentent (supérieures à 1 pour les patchs 1x1 et supérieures à 4 pour les patchs 2x2 et 3x3). Pour les distances inférieures, les non-restreints survivent et éliminent les restreints. On peut également noter qu'une légère fragmentation a même tendance à vitaliser les agents non-restreints (pour les patchs 1x1, on passe par exemple d'une population de base de 35 à 90 agents lorsque les patchs sont séparés les uns des autres par une seule cellule : tous les 2 "pas de temps" un agent tombe obligatoirement sur une cellule vide, ce qui l'empêche de se nourrir et de se reproduire trop rapidement). A noter également que pour les configurations 3x3, les non-restreints sont rapidement éliminés au-delà d'une distance de séparation de 4 cellules entre les patchs alors que les agents restreints survivent beaucoup plus longtemps (1800 à 2000 pas de temps). Mais à terme, ces populations disparaissent également. Or cette configuration que nous présentons habituellement pour surprendre notre auditoire (cf. chap. 4.3.2) et que nous pensions stable, me surprend moi-même : le résultat n'est pas celui que l'on présente car les "gentils agents" finissent également par disparaître.

Pour les patchs supérieurs à 10 cellules de côté, les agents non-restreints survivent systématiquement. Les non-restreints sont exclus (à part quelques cas exceptionnels liés à des situations d'auto-effondrement des non-restreints), même si on remarque un léger accroissement des durées de survie avec l'éloignement des îlots de plantes. On peut d'ailleurs imaginer que pour des grands patchs très éloignés les uns des autres, certaines répartitions initiales des agents pourraient amener à la survie de colonies d'agents restreints établis sur quelques îlots : sans moyen de traverser ces grandes étendues désertiques, les agents non-restreints ne pourraient pas atteindre ces foyers d'agents restreints pour y semer la panique et la désolation.

Pour les patchs de tailles intermédiaires (5x5 et 6x6), on constate une inversion des tendances avec l'éloignement des patchs : pour des distances courtes, les agents non-restreints éliminent les restreints, mais au-delà d'un certain seuil (distance entre 4 et 8), les populations de restreints survivent quand les non-restreints ne parviennent pas à s'adapter. C'est donc seulement sur cette étroite zone de configurations spatiales que les processus d'exclusion s'inversent. Dans certains cas, on peut même constater des phénomènes de covaibilité des populations. Dans la lignée des pionniers de la vie artificielle, on peut penser que ces zones sensibles favorisent "la vie au bord du chaos" [Lewin, 1994].

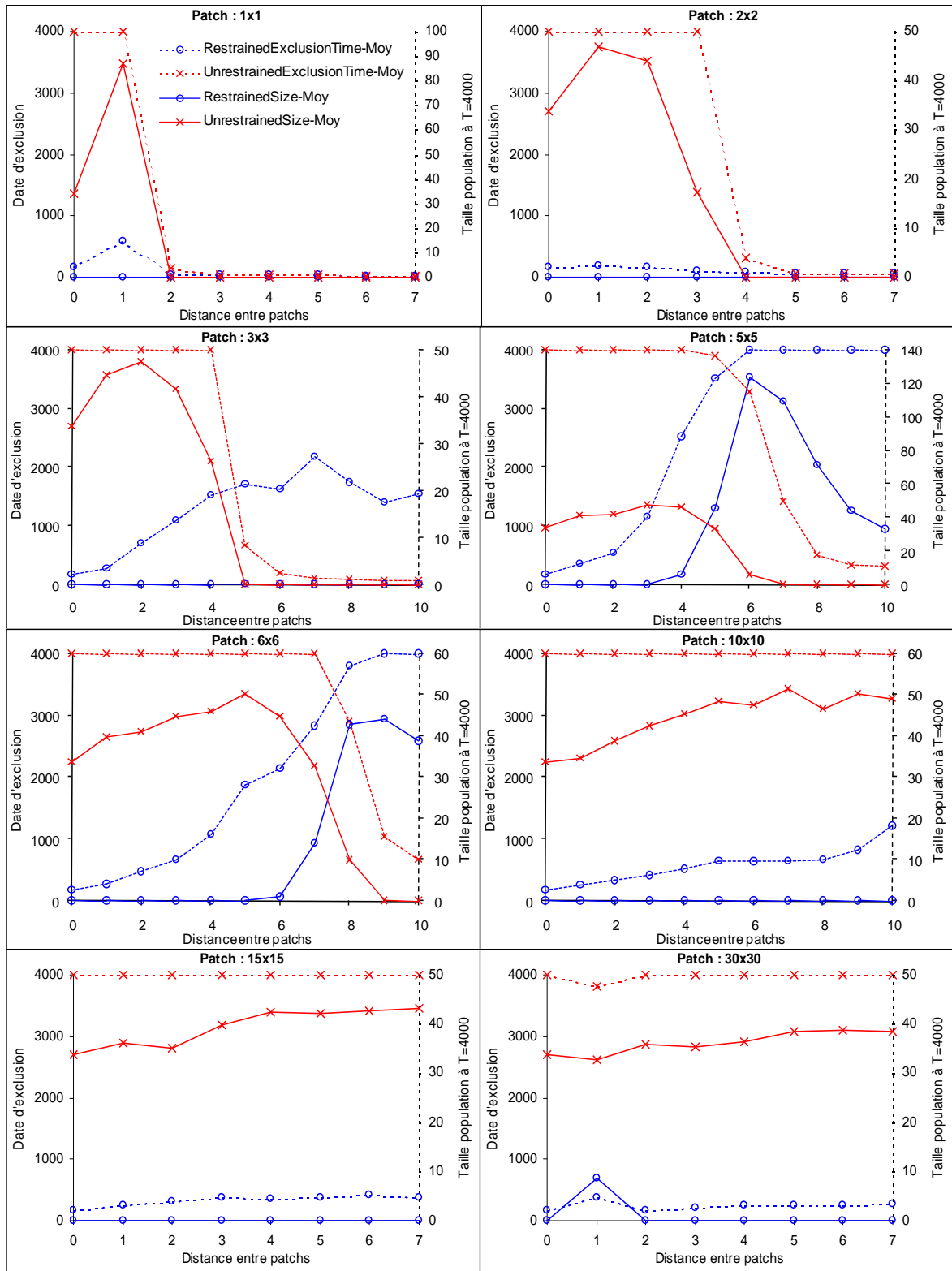


Figure 8-20 : Quelques résultats de l'analyse de fragmentation du paysage. Chaque point représente la moyenne sur 20 simulations de la taille des populations (traits continus) et de la date d'exclusion (traits pointillés).

8.4 DISCUSSION

8.4.1 Vérifier, comprendre et simplifier

A travers l'étude d'un modèle simple ou qui semblait simple a priori, j'ai illustré une démarche d'exploration. L'objectif n'était pas d'analyser ECEC mais de montrer à travers son exploration la richesse étonnante que l'on pouvait en tirer. Etape indispensable du processus de modélisation, l'exploration d'un modèle doit opérer à deux niveaux : au niveau individuel d'une part, pour vérifier l'enchaînement des mécanismes et corriger des aberrations sur le comportement des agents, et au niveau global d'autre part, pour hiérarchiser les influences des paramètres sur la dynamique générale. Elle permet de corriger des points de dysfonctionnement et de vérifier la logique générale pour mieux comprendre le comportement global du modèle et mieux en expliquer les résultats. Les surprises qu'elle ne manque pas de susciter, interpellent et occasionnent des remises en questions constructives. D'autre part, elle permet d'identifier des paramètres ou des parties de la structure qui n'influencent pas les dynamiques. Elle autorise alors des simplifications du modèle, certifiées par la démarche.

8.4.2 Sensibilité et robustesse

Comme je l'ai expliqué dans les chapitres précédents, il faut désormais ajouter une évaluation des impacts liés à l'ordonnancement des agents. Les explications fournies aux chapitres 5, 6 et 7 montrent que cette étude est souvent indispensable. L'outil développé par T. Meurisse (cf. chap. 10.1.3.3) peut faciliter ce travail. L'analyse de l'ordonnancement des agents que j'ai menée sur ECEC laisse apercevoir quelques différences entre les scénarios les plus caricaturaux : les plus faibles d'abord (*weakestFirst*) ou ordre figé (*UnrestrainedFirst* puis *Restrained*). Mais ces différences sont minimales par rapport aux autres paramètres⁸¹ et ne changent pas profondément les schémas généraux d'évolution (patterns)⁸² tels que les variations cycliques de la population des agents non-restreints, les cycles décalés entre populations d'agents et énergie végétale "à la Lotka-Volterra", ou encore l'élimination des agents restreints. Par conséquent, l'ordonnancement aléatoire de tous les agents apparaît comme une solution raisonnable dans le cas de ECEC (ce qui ne signifie pas que c'est la solution systématique à adopter pour tout modèle !).

Au regard de ces analyses, on peut estimer que le modèle est robuste dans la mesure où les schémas généraux qu'il capture, restent observables dans une large gamme de valeurs des paramètres. A ce sujet, l'analyse de robustesse, terme que l'on relève parfois dans la littérature, est une autre façon de parler des analyses de sensibilité. L'analyse de robustesse est le pendant de l'analyse de sensibilité, mais [Grimm & Railsback, 2005] estiment que la robustesse véhicule des valeurs plus positives pour cette discipline qu'ils reconnaissent comme encore fragile. Car expliquent-ils, face à une communauté scientifique encore sceptique vis-à-vis des SMA, la terminologie du vocabulaire utilisé reste un facteur important.

Tout comme l'analyse de sensibilité, l'analyse de robustesse permet d'étudier les résultats du modèle, mais surtout d'identifier les mécanismes qui produisent ces résultats. Ces derniers sont si robustes aux changements de paramètres ou à des modifications de la structure du modèle, qu'ils lui procurent vraisemblablement un certain intérêt. Ces analyses permettent d'apprécier la robustesse des caractéristiques du modèle. A l'opposé, on peut estimer qu'un modèle manque de robustesse quand les patterns qu'il exhibe ne sont produits qu'à l'intérieur d'un intervalle étroit de

⁸¹ C'est la raison pour laquelle je n'ai pas surchargé ce chapitre avec ces résultats, car l'idée n'est pas de présenter ECEC mais de reconnaître l'intérêt d'une analyse de sensibilité.

⁸² Le "Pattern" en anglais exprime plus succinctement cette notion de schéma général évolutif ou de configuration spatiale particulière et reconnaissable. Ce terme sera utilisé pour la suite de l'exposé.

valeurs des paramètres⁸³. Cette hypersensibilité des modèles constitue d'ailleurs une critique récurrente vis-à-vis des SMA : ils ne servent à rien car ils permettent de dire tout et son contraire. Aussi, montrer la robustesse d'un modèle en indiquant les zones de stabilité permet de contrer ce type de critiques.

C'est la raison pour laquelle une connaissance fine des valeurs des paramètres ne me semble pas indispensable pour concevoir un modèle. Si les réponses apparaissent à la fois pertinentes et robustes aux changements, le concepteur aura su saisir des caractéristiques importantes de son objet d'étude. Evidemment, ceci implique d'identifier auparavant les patterns que l'on souhaite reproduire. Toujours est-il que la robustesse d'un modèle me semble bien plus importante que l'ajustement exact des paramètres. Ceci explique pourquoi je ne traite pas ici des problèmes de calibrations qui sont par ailleurs très souvent discutés lorsque le sujet de la "validation" est abordé.

8.4.3 Importance des configurations initiales

Pour finir, j'insisterai sur l'analyse des configurations initiales à considérer lors de l'étude d'un SMA. En effet, l'état initial d'un monde virtuel peut fortement influencer la dynamique future. Il ne s'agit pas exactement d'aborder le problème de la sensibilité aux conditions initiales tel qu'il est énoncé par les partisans du chaos déterministe (cf. chap. 2.3.2 et 5.2.4), mais plutôt de comprendre l'impact d'une configuration initiale quelconque sur le comportement d'un modèle.

Souvent, on se contente d'un état initial généré aléatoirement ou issu de données. Mais n'étudier un modèle qu'à partir d'une seule configuration, peut être à l'origine d'interprétations erronées, car son comportement peut être fortement dépendant de cet état initial. Ainsi, la conformation fragmentée de l'espace dans ECEC peut conduire dans certains cas à des phénomènes qui contredisent les tendances générales. Toujours dans ECEC, un état initial riche peut facilement conduire à l'élimination de tous les agents. Mais lorsqu'ils survivent à la première crise, on remarque que la valeur moyenne de la végétation est bien inférieure à la valeur initiale (cf. Figure 8-9). Ramener alors l'état initial de la végétation à une valeur prise après la première crise (donc au cours d'une simulation, à un "pas de temps" éloigné) limite la portée de cette crise et réduit ainsi la disparition des agents. En conséquence, pour limiter les chocs liés à une configuration donnée, il est judicieux de prendre pour point de départ une configuration plus harmonieuse extraite par exemple à partir d'un état de convergence du système.

C'est, par exemple, la solution qu'ont choisi [Bousquet et al., 2001] pour étudier un modèle de gestion : la chasse des Céphalophes (une petite antilope) dans les forêts de l'Est du Cameroun, autour d'un village nommé Djemiong. Cette étude vise à comprendre si l'organisation entre les villageois conduit à une chasse durable. Plus exactement, ils cherchent à savoir si des règles d'accès à l'espace, à différents moments de l'année, peuvent être considérées comme une gestion adaptée. Le modèle multi-agent qu'ils proposent est constitué d'une partie biologique regroupant les dynamiques naturelles de la population des céphalophes et d'une partie d'agents chasseurs exploitant cette ressource en posant des pièges dans des zones de chasse.

La partie biologique est issue d'études sur le comportement du céphalophe. Mais avant de coupler cette dynamique des populations avec les activités d'agents chasseurs, les auteurs ont pris le soin d'analyser les configurations initiales qui leur paraissaient les plus proches d'un état observé. Pour cela, ils ont mené des simulations sur un sous-modèle qui représente uniquement les dynamiques des antilopes. La figure suivante montre différentes dynamiques issues de configurations initiales aléatoires.

⁸³ Des exemples intéressants sont présentés par [Grimm & Railsback, 2005] au chapitre 9, page 337-338. Ils illustrent ces notions de robustesse en comparant des modèles différents ciblant un même phénomène.

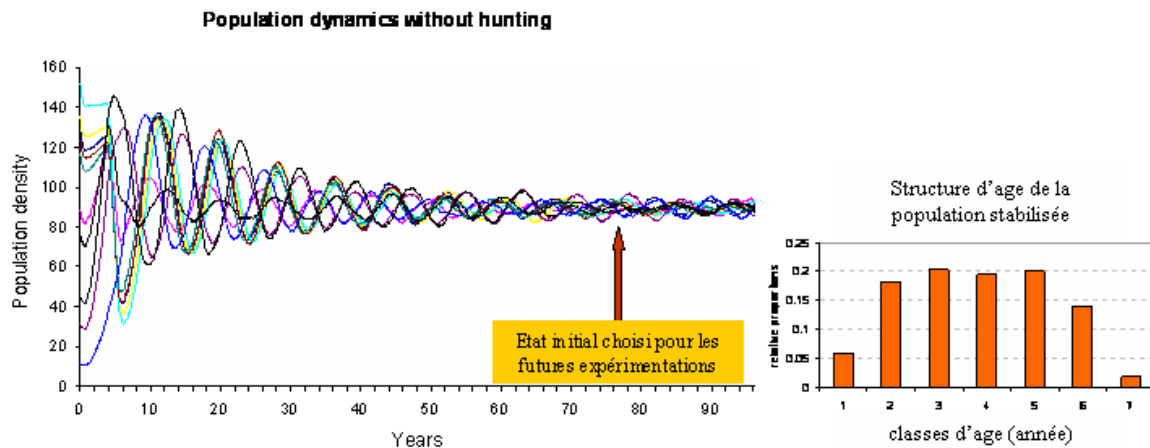


Figure 8-21 : Dynamiques simulées des populations de Céphalophes, sans chasse. A gauche, évolutions des densités de populations en fonction d'états initiaux variables. A droite, structure des classes d'âge des populations moyennes à $t=90$ ans, d'après [Bousquet et al., 2001].

Ici encore, la dégradation du modèle initial par découplage des dynamiques montre tout son intérêt. Ainsi, pour la suite des simulations avec couplage, la configuration initiale des Céphalophes a été choisie sur la base d'un état plus équilibré issu de la convergence des différentes populations. Pour limiter les biais liés à une configuration initiale souvent approximative, il est donc indispensable d'étudier les réactions d'un modèle à d'autres configurations.

8.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre montre l'importance de la phase d'exploration des modèles qui ne doit pas être négligée dans un processus de modélisation.

"New modelers often see building a model as their main task, but analyzing a model is every bit as essential as building it" [Grimm & Railsback, 2005]

Au contraire, elle constitue une étape nécessaire qui procure son lot de surprises. En améliorant la compréhension du modèle, elle permet d'en déceler les dysfonctionnements, de hiérarchiser l'influence des paramètres et de tester la robustesse des concepts qu'il véhicule.

Sous le terme "exploration d'un modèle" se cache deux analyses :

- l'analyse de la structure, focalisée sur le niveau individuel et l'enchaînement des activités, cherche à vérifier pas à pas les anomalies de comportement des agents;
- l'autre, souvent appelée analyse de sensibilité, s'attache à mesurer l'influence des paramètres au niveau global.

L'exploration permet de vérifier et de corriger la cohérence générale d'un modèle, d'identifier des zones sujettes à simplification, de mieux expliquer le comportement global et de tester la robustesse de ses hypothèses. D'ailleurs, l'étude d'un simulateur nécessite souvent un retour sur la conception et relance le processus cyclique de modélisation. Car la validité d'un modèle dépend plus de sa structure et de ses mécanismes que de ses paramètres.

Laissons à nouveau la parole à [Grimm & Railsback, 2005] qui expliquent que

"Analyzing a model means doing research on a model to learn about its behavior and to learn about the system the model represents. Objectives of this research typically include verifying that the software does what we want it to, finding good model structures and theory for individual traits, finding good parameter values, and finally solving the problems we design the model for in the first place and learning something about ecosystems". [ibid.]

En effet, la modélisation multi-agent souffre encore d'un manque de crédibilité. Elle est même considérée par certains comme une technique amusante mais sans fondement. Pour retrouver davantage de scientificité, il est donc important de "faire de la recherche" sur son modèle et d'en explorer de façon rigoureuse les hypothèses et les conséquences. Evidemment, plus le modèle est compliqué et plus cette exploration est fastidieuse et difficile, mais plus elle est indispensable.

Tester et prouver la robustesse d'un modèle permet par ailleurs de montrer qu'un SMA n'est pas forcément un objet hyper sensible. Son comportement ne doit pas dépendre uniquement de la finesse avec laquelle ses paramètres ont été fixés. Si la moindre modification de ces valeurs ou des conditions initiales entraîne une réponse diamétralement opposée, il n'aide pas beaucoup à la compréhension du phénomène étudié.

L'exploration des modèles est en elle-même un thème qui pourrait faire l'objet d'une thèse tellement le sujet est intéressant et reste encore à défricher. Une conférence sur ce sujet (SAMO84) a récemment vu le jour sous l'impulsion d'Andrea Saltelli. En France, le réseau "exploration numérique des modèles", animé par Vincent Ginot et Hervé Monod cherche à approfondir ces réflexions. Le projet SimExplorer, animé par le LISC (Cemagref de Clermont-Ferrand) a pour objectif le développement d'une plate-forme pour générer des plans d'expériences pouvant accueillir n'importe quel simulateur et pour distribuer des batteries de simulations sur des machines en réseau. Animé par F. Amblard à l'IRIT, le projet TEAMSS (Tools and methods for numerical Experimentation on Agent-based Models in ecology and Social sciences) intègre les deux premiers projets pour proposer une plate-forme complète, de la conception à la calibration de SMA en sciences sociales.

Mais la scientificité d'un modèle dépend aussi de la répliquabilité de ses résultats et de la transparence de sa structure. C'est l'objet du prochain chapitre.

⁸⁴ SAMO : Conference on Sensitivity Analysis of Model Output, <http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu/>

Chapitre 9

DECRIRE POUR PERMETTRE LA CRITIQUE ET LA REPLICATION

"J'y ai appris que mieux valait être compris de tous plutôt qu'approuvé par certains. Le désaccord qui fait partie de la vie, vaut mieux que l'ambiguïté"

*Extrait du discours d'investiture de l'ambassadeur de France au Brésil.
Septembre 2006.*

Le résultat de la modélisation implique que le concepteur forme un modèle du modèle : une compréhension schématique de son fonctionnement. Pour que ce travail puisse être critiqué, sa description doit être compréhensible par tous. Comme expliquer au premier chapitre, un bon modèle doit être réfutable. La critique fondée d'un modèle n'est pas négative en soi mais au contraire suscite des remises en cause des connaissances acquises et stimule une nouvelle boucle d'apprentissage. Au-delà de toute technologie, je considère que ce point est fondamental. Les reproches faits aux SMA touchent d'ailleurs moins au problème de leur "validation" qu'à celui de leur lisibilité.

La description du modèle doit donc être la plus claire possible et lisible par un public varié. Il ne doit pas être réservé aux seuls informaticiens. Un modèle multi-agent est un outil d'analyse et de prospection mais également un objet de discussion à partager avec d'autres scientifiques ainsi qu'avec les acteurs du développement. Or la complexité d'un modèle peut rapidement obscurcir son propos. Il est donc nécessaire d'en épurer la description pour en éclairer le contenu et en exposer simplement et sans ambiguïté la structure et le fonctionnement.

Cette nouvelle présentation permet également de rendre possible la reproduction du modèle informatique par d'autres pour en vérifier les résultats. Cependant, cette parfaite explicitation du modèle reste encore un idéal, car de nombreuses expériences de réécriture de modèles se sont soldées par des échecs.

9.1 LA REPLICATION : UNE NECESSITE POUR TOUTE DEMARCHE SCIENTIFIQUE

9.1.1 Pourquoi répliquer ?

Lors d'un entretien radiophonique⁸⁵, le physicien Alain Aspect, médaille d'or 2005 du CNRS, explique que le rêve de tout chercheur est de remettre en cause les dogmes. "On n'est jamais plus heureux que lorsque l'on découvre dans son laboratoire un résultat qui ne correspond pas à ce que l'on attendait". Mais pour autant, il ne faut pas se précipiter sur ce premier résultat. S'il découvre quelque chose, le chercheur doit vérifier que l'effet est reproductible et qu'il n'est pas explicable par un petit paramètre annexe que l'on avait négligé. Après plusieurs vérifications en internes, "il faut publier son résultat pour que les collègues puissent refaire la même expérience". S'ils

⁸⁵ http://www.radiofrance.fr/chaines/france-culture2/emissions/continent_sciences/fiche.php?diffusion_id=44926

parviennent à reproduire le même phénomène dans un autre laboratoire, cela signifie que le fait est avéré⁸⁶. Pour A. Aspect, la méthode scientifique repose sur l'aptitude à vérifier des résultats et à les reproduire en plusieurs endroits.

Cette façon de considérer la science doit être également présente dans le domaine des SMA. Si la modélisation multi-agent souffre d'un manque de crédibilité au sein de la communauté scientifique, une des raisons de ce scepticisme provient certainement du manque de transparence des modèles et de la grande difficulté à reproduire les résultats qu'ils énoncent. On ne peut pas se fier au discours véhiculé par un modèle sur la seule base de la confiance accordée à l'implémentation du simulateur. Non pas que l'implémentation ait volontairement été trafiquée pour obtenir le résultat souhaité (quoi que...), mais surtout que les possibilités de générer des biais involontairement sont importantes comme on l'a vu au long de cette thèse. Comme l'expriment Edmonds et Hales,

"An unreplicated simulation is an untrustworthy simulation - do not rely on their results, they are almost certainly wrong". [Edmonds & Hales, 2003],

A l'instar d'une expérience de laboratoire, une expérience de simulation doit donc pouvoir être répliquée pour confirmer ou réfuter ses résultats.

9.1.2 Répliquer des résultats de simulations à partir de spécifications

La réplication ne signifie pas la reproduction des résultats par la simple copie du programme. Normalement la copie du code d'un simulateur ne pose pas de problème. Toutefois, il peut y avoir des incompatibilités entre machines ou des problèmes de pérennité du code liés à l'évolution des langages informatiques et des plates-formes de simulation. Il est également souhaitable de vérifier un simulateur de cette manière, car comme l'ont montré [Polhill et al. 2005], des erreurs de calcul numérique liées au langage et au système d'exploitation utilisé peuvent être décelées.

Mais si on accepte la proposition de Zeigler [Zeigler et al., 2000] qui différencie le modèle du simulateur (voir chapitre 4.6.1, ainsi que [Gilbert, 1998] et [Edmonds & Hales, 2003]), la nuance est plus subtile : la réplication dans ce cas consiste à ré-implémenter un simulateur à partir des spécifications d'un modèle conceptuel. Cette étape est importante pour révéler les phénomènes de divergence implémentatoire [Michel, 2004]⁸⁷.

Seulement, la réplication ne va pas de soi et plusieurs expériences se sont soldées par des échecs [Galan & Izquierdo, 2005]. D'ailleurs, une conférence dédiée à ce sujet, appelée Model-To-Model (M2M), a vu le jour sous l'impulsion de David Hales, Juliette Rouchier et Bruce Edmonds [Hales et al., 2003]. M2M a été édité par la revue en ligne JASSS qui consacre un numéro spécial à cet événement⁸⁸ et qui depuis impose la mise à disposition de pages dédiées à la description détaillée

⁸⁶ Sans revenir sur l'épisode de "la mémoire de l'eau" qu'il considère comme trop polémique, A. Aspect prend deux exemples : (i) la fusion froide publiée par une équipe américaine il y a 15 ans où il était question d'une expérience de fusion nucléaire dans un tube à essai. Aucune équipe n'a pu refaire cette expérience. "On sait maintenant que la fusion froide n'existe pas". (ii) D'autres chercheurs annoncent qu'ils ont observé la supraconductivité à haute température, ce qui allait contre tous les dogmes. Après publication et réplication de l'expérience, l'affirmation est avérée. Cette expérience leur a valu le prix Nobel.

⁸⁷ Les phénomènes de divergence implémentatoire [Michel 2004] sont bien connus en informatique et des techniques de vérification sont proposées. Il ne s'agit pas de validation au sens fort, mais juste de vérifier si les spécifications ont été respectées dans la phase d'implémentation. Des techniques de vérification hiérarchique peuvent aider le programmeur, mais elles s'avèrent rapidement limiter avec la complexification même mesurée des modèles. En effet, ces méthodes traditionnelles de vérification sont basées sur la comparaison des sorties avec les spécifications initiales. Elles font l'hypothèse que nous savons a priori ce que le programme devrait faire. Or ces limitations apparaissent précisément lorsque l'on souhaite étudier des phénomènes émergents. Souvent l'expérimentateur ne sait pas a priori ce qu'il doit attendre et découvre les réactions de son programme lors des simulations.

⁸⁸ (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4>). A noter que M2M ne se limite pas à la réplication de modèles, mais traite aussi de composition de modèles et de la comparaison de modèles ciblant un même objet : l'alignement de modèle ou

des modèles qui sont publiés par cette revue. D'autres initiatives ont également été menées, telles que le projet CAR⁸⁹ qui, à la suite d'un article de [Axelrod, 1997], cherchait à répliquer huit modèles issus des sciences sociales.

Sans même parler des multiples ré-implémentations de Sugarscape [Epstein & Axtell, 1996], voici quelques exemples de réplifications erronées effectuées à partir de modèles publiés dans des revues pourtant prestigieuses :

- [Rouchier, 2003], à partir des spécifications de [Duffy, 2001] dont le modèle est lui-même une adaptation aux SMA d'un modèle économétrique de [Kiyotaki-Wright, 1989].
- [Rand & Wilensky, 2006], à partir d'un modèle traitant de l'apparition de comportements ethnocentriques [Axelrod & Hammond, 2003].
- [Edmonds & Hales, 2003], à partir de l'article de [Riolo et al. , 2001]⁹⁰ qui aborde l'émergence de la coopération parmi une population d'agents individualistes se regroupant par préférence de ressemblance.

Une explication rapide de ces exemples permettra de mesurer les difficultés rencontrées.

9.1.3 Exemple : [Rouchier, 2003] à partir des spécifications de [Duffy, 2001]

Malgré la précision de l'article de J. Duffy et même après des échanges multiples avec l'auteur pour vérifier des choix d'implémentation, J. Rouchier n'a pas pu reproduire les résultats de son modèle⁹¹. Sceptique quant à la validité des résultats initiaux, elle remarque que les spécifications sont insuffisantes pour pouvoir correctement répliquer le modèle conceptuel. En particulier, *"the description of the rationality of agents is too verbal and not sufficiently algorithmic, which leaves some elements ambiguous"* [Rouchier, 2003]. D'après J. Rouchier, les raisons de son échec pourraient être :

- Des erreurs de programmation de sa propre version, malgré le soin particulier à suivre les explications du papier de Duffy (Rouchier recommande d'ailleurs une mise à disposition plus générale des codes).
- La qualité des générateurs de nombres pseudo-aléatoires. Mais dans son article, Duffy précise qu'il a essayé plusieurs générateurs pour s'assurer qu'aucun d'eux n'affecte ses résultats. Il conclut d'ailleurs qu'il observe seulement des résultats structurels. Surtout pour si peu d'agents (seule une poignée est instanciée à l'initialisation), la qualité du générateur ne me semble pas essentielle (cf. chap. 9.1.6).

docking ou mapping (cf. chap. 1.4.5). [Ramat, 2006] explique que "pour un même système et pour des modélisateurs différents, l'activité de modélisation va donner naissance obligatoirement à des modèles différents. [...] Dans ce cas, on cherche à vérifier que les deux modélisations sont équivalentes et on parle alors de mapping. Le mapping cherche à construire une bijection entre les éléments des deux modèles".

⁸⁹ <http://www.cscs.umich.edu/Software/CAR-replications.html>

⁹⁰ R. Axelrod, co-auteur de ce modèle, est pourtant bien au courant de ces problèmes car il est à l'origine de ces questions sensibles de réplification. Dans [Axelrod, 1997], il explique qu'une publication est insuffisante pour décrire un modèle et ses résultats. Car, souligne-t-il, ils sont souvent complexes et le manque de place accordé par les revues empêche de détailler leur structure et leur dynamique. De plus, les explications trop succinctes demeurent souvent ambiguës car elles sont souvent exprimées de façon narrative.

⁹¹ Ce modèle traite d'agents consommateurs et producteurs qui s'échangent des biens et spéculent. Ce travail a été couplé à des applications en économie expérimentale. Le but de ce type de recherche est de vérifier si les renseignements qui sont donnés d'une façon distribuée sont suffisants pour que des individus puissent adopter un comportement optimal. Pour concevoir de nouvelles expériences, Duffy formule des hypothèses où les capacités d'apprentissage d'agents seraient renforcées. Il propose un algorithme et l'utilise pour produire des agents rationnels artificiels. Il vérifie alors la cohérence des mécanismes cognitifs en comparant les résultats des simulations avec les données réelles.

- Une dépendance trop forte des résultats aux conditions initiales. Pour des agents évolutifs dont les facultés d'apprentissage par renforcement dépendent de leurs interactions, on peut supposer que la taille réduite des populations et la durée limitée des simulations jouent fortement sur les probabilités de rencontres.

En conclusion, J. Rouchier recommande l'établissement d'un cadre commun de description et de protocoles de validation entre la communauté de l'économie expérimentale et la communauté multi-agent. Pour la communication des résultats, elle invite à décrire les sorties de simulations à un niveau macro (résultats agrégés), mais elle préconise aussi une description à un niveau plus élémentaire pour mieux capturer les processus d'apprentissage dans des contextes économiques. Mais à l'heure actuelle, les raisons de cet échec restent encore obscures. Une autre expérience de réplication indépendante permettrait peut-être de lever le voile.

9.1.4 Exemple : [Rand & Wilensky, 2006] à partir des spécifications de [Axelrod & Hammond, 2003]

Sans jamais remettre en question le simulateur original de [Axelrod & Hammond, 2003], W. Rand et U. Wilensky ont tenté d'en reproduire les résultats. Il leur a fallu sept versions et de nombreux échanges avec les concepteurs pour y parvenir finalement. Ici aussi, la réplication n'allait pas de soi. Au final, les auteurs concluent que *"the model now has a higher level of validity since the results have been borne out by two separate implementations"* [Rand & Wilensky, 2006].

Le plus intéressant dans cette expérience (ainsi que dans plusieurs autres que je ne développe pas ici), sont les problèmes auxquels les "replicators"⁹² se sont heurtés. Ces difficultés résultent essentiellement de spécifications insuffisantes des interactions ou de gestion du temps. Dans le cas présent, l'enquête menée par les auteurs a montré que les écarts entre le simulateur original et répliqué étaient dus à un ordonnancement différent des activités de chaque agent ([immigrate, birth, death, interact] plutôt que [immigrate, interact, birth, death]), ainsi qu'à la façon de les activer : dans la version originale, la liste des agents à activer est toujours randomisée avant la phase de reproduction alors qu'elle restait arbitrairement ordonnée dans les premières versions répliquées. Les auteurs expliquent que :

When the list was unshuffled some agents would be repeatedly preferentially selected. Since the space for reproduction is a scarce resource, the preferentially select agents would have a greater chance of reproducing. This would cause a bias throughout the Wilensky-Rand model toward these preferentially selected agents [ibid.].

La gestion du temps et des interactions apparaît à nouveau comme un problème sensible et il n'est pas étonnant après les chapitres 6, 7 et 8 présentés dans cette thèse, de les voir réapparaître ici.

9.1.5 Exemple : [Edmonds & Hales, 2003] à partir des spécifications de [Riolo et al., 2001]

L'échec de la réplication par Edmonds et Hales du modèle de Riolo, Cohen et Axelrod (pourtant publié dans Nature) est également dû au fait d'une interprétation différente des interactions. Mais le travail décrit ici est un peu différent : sans s'entraider pendant la phase d'implémentation et après avoir choisi des langages de programmation différents, les deux auteurs, ont obtenu indépendamment, des résultats plutôt proches l'un de l'autre. Par contre, leurs simulateurs

⁹² Les auteurs proposent un vocabulaire dédié à ce sujet de la réplication : "conceptual model", "model builders" pour les concepteurs et les programmeurs, "original model" et "replicated model" (mais je leur préfère "original simulator" et "replicated simulator"), et "replicator" (à la limite de la science fiction !) pour la personne qui tente de répliquer le simulateur original.

différent significativement de la version originale. Le graphe suivant décrit le processus de double réplcation qu'ils ont suivi.

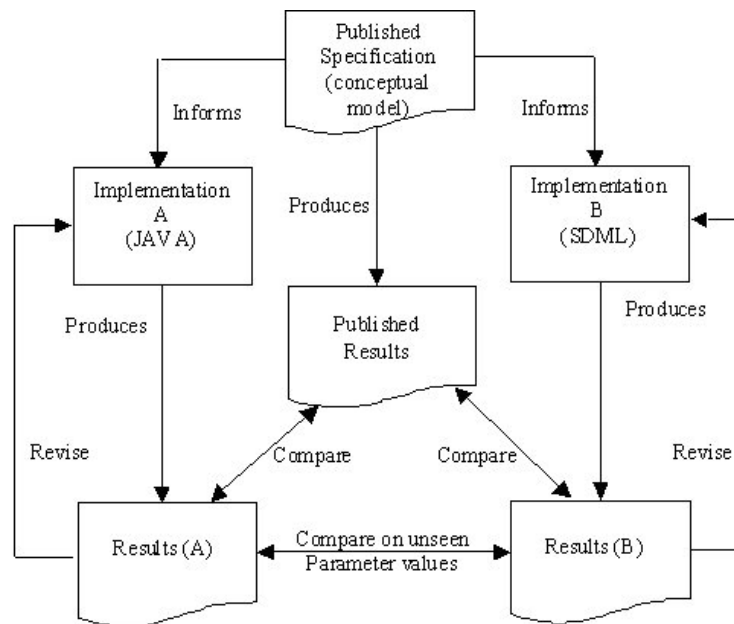


Figure 9-1 : Expérience de double réplcation par [Edmonds & Hales, 2003].

Les résultats de la première réplcation (A) concordent globalement avec ceux du modèle de Riolo, mais les seuils les changements de comportement (donation ou non) diffèrent. La place attribuée par la revue Nature au papier original limite la description du modèle. Pour cette raison, les auteurs ont ré-implémenté le modèle (B). Les nouveaux résultats sont globalement similaires. Mais il est impossible de prouver que les implémentations sont les mêmes. Seules des simulations peuvent réfuter cette hypothèse. Or il est toujours possible de trouver des cas critiques (erreurs d'arrondis, générateur de nombres pseudo-aléatoires, etc.) montrant des différences. Néanmoins, étant donné que les deux implémentations indépendantes se rejoignent, il est probable que le problème relève du simulateur original; c'est d'ailleurs ce qu'en déduisent les auteurs.

Après une étude approfondie, les "replicators" ont finalement trouvé l'origine des divergences avec le simulateur original : il s'agissait d'un problème d'inéquation en cas de valeurs égales lors de la phase de reproduction des agents : lors de cette phase, chaque agent *a* choisit aléatoirement un autre agent *b* et compare les scores respectifs; l'agent possédant le score le plus élevé se reproduira effectivement. Voici ce que dit le texte original :

After all agents have participated in all pairings in a generation, agents are reproduced on the basis of their score relative to others. The least fit, median fit, and most fit agents have respectively 0, 1 and 2 as the expected number of their offspring. This is accomplished by comparing each agent with another randomly chosen agent, and giving an offspring to the one with the higher score. [Riolo et al. , 2001]

Le problème survient en cas d'égalité. Edmonds et Hales avaient choisi une solution qu'ils estimaient "sans biais" : en cas de scores égaux, un des deux agents en compétition est sélectionné aléatoirement pour se reproduire. Or ils ont constaté que ce choix n'avait pas été suivi par les concepteurs : en comparant les scénarios, ils en ont déduit que ces derniers ne traitaient pas spécifiquement le cas d'égalité de scores mais utilisaient un algorithme de ce type :

```

IF score (a) >= score (b) THEN
  Reproduce (a) in next generation
ELSE score (a) < score (b)
  Reproduce (b) in next generation
  
```

Ils estiment que cette solution qu'ils nomment "selected bias", est biaisée :

It was found that the authors of both re-implementations had independently assumed that the "no bias" algorithm was the correct interpretation of the natural language description given in the original published article. However, it was determined that the "selected bias" algorithm reproduced the results given. Hence it would appear that Riolo et al, used the "selected bias" method and that this was the reason for the different results obtained from the two previous re-implementations. [Edmonds & Hales, 2003]

Sans porter de jugement sur ces appréciations, on peut reconnaître que les auteurs ont réussi à identifier un point d'ambiguïté susceptible d'interprétations différentes et de résultats divergents.

Ayant enfin réussi à répliquer le simulateur original, les auteurs explorent davantage son comportement. Ici, leur travail est encore plus intéressant car ils montrent que la robustesse du modèle s'effondre pour un problème similaire d'inéquation. En changeant dans la méthode de "donation" l'inéquation qui compare la tolérance des donneurs ($|t_D - t_R| \leq T_D$) par une inéquation stricte ($|t_D - t_R| < T_D$), les phénomènes de coopération relevés dans l'article original disparaissent. Ainsi, un détail si minime du modèle est susceptible de réfuter le discours qu'il véhicule.

Les auteurs concluent que l'expérience de double réplcation permet de révéler des parties obscures ou ambiguës du modèle qui sont à l'origine de difficultés de ré-implémentation. Outre le manque de clarté d'une publication, les réplcations peuvent dévoiler des faiblesses, voire des erreurs d'énoncé :

Clearly, simply implementing simulations with respect to a conceptual model and then "eyeballing" their outputs for consistency with the conceptual model and data series is insufficient to ensure the correctness of an implementation. [...]. In this case, the replication revealed some weaknesses in the original model, which otherwise might not have come to light.[ibid.]

La révélation des faiblesses d'un modèle grâce à la réplcation⁹³ démontre le rôle précieux que celle-ci peut jouer dans une démarche globale de modélisation.

9.1.6 Qualité du générateur de nombres pseudo-aléatoires

Pour estimer la qualité d'une réplcation, [Axelrod, 1997] propose une classification en trois niveaux décroissants :

- Le niveau "d'identité numérique" pour lequel les résultats sont reproduits précisément,
- Le niveau "d'équivalence distributionnelle" pour lequel les résultats sont statistiquement équivalents, et
- Le niveau "d'équivalence relationnelle" qui reconnaît des relations qualitatives entre les sorties.

Certains pensent que la qualité des générateurs de nombres pseudo-aléatoires influence beaucoup les résultats d'un modèle stochastique. Evidemment, si l'on souhaite obtenir une réplcation qui entre dans le niveau "d'identité numérique" selon la classification d'Axelrod, il faudra utiliser le même générateur que pour le simulateur original et comparer les sorties en fixant la valeur de la graine aléatoire.

Mais si l'on souhaite rester dans des équivalences plus qualitatives, la fiabilité du générateur ne semble pas être un critère déterminant. Les travaux de [Rouchier, 2003] et [Duffy, 2001] décris précédemment, l'attestent. De même, dans l'expérience de réplcation de Sugarscape, [Michel, 2004] a testé la sensibilité des simulations en remplaçant la classe *Random* fournit par défaut par Java, par un autre générateur basé sur l'algorithme Mersenne–Twister [Matsumoto & Nishimura, 1998]. Les conclusions qu'il tire de cette expérience montrent également que la qualité du

⁹³ "Replication can also be useful for testing the robustness of inferences from models". [Axelrod, 1997]

générateur de nombres pseudo-aléatoires n'est pas en cause pour expliquer les variations des résultats.

La question de la qualité des générateurs actuels doit se poser uniquement lorsque l'état initial du système comporte un très grand nombre d'entités. Par exemple, l'initialisation aléatoire des cellules d'une grille de très grande taille risque de montrer une certaine régularité si le tirage aléatoire repose sur un générateur de piètre qualité (voir figure suivante). Mais pour un nombre raisonnable d'agents, la qualité du générateur ne me semble pas primordiale.

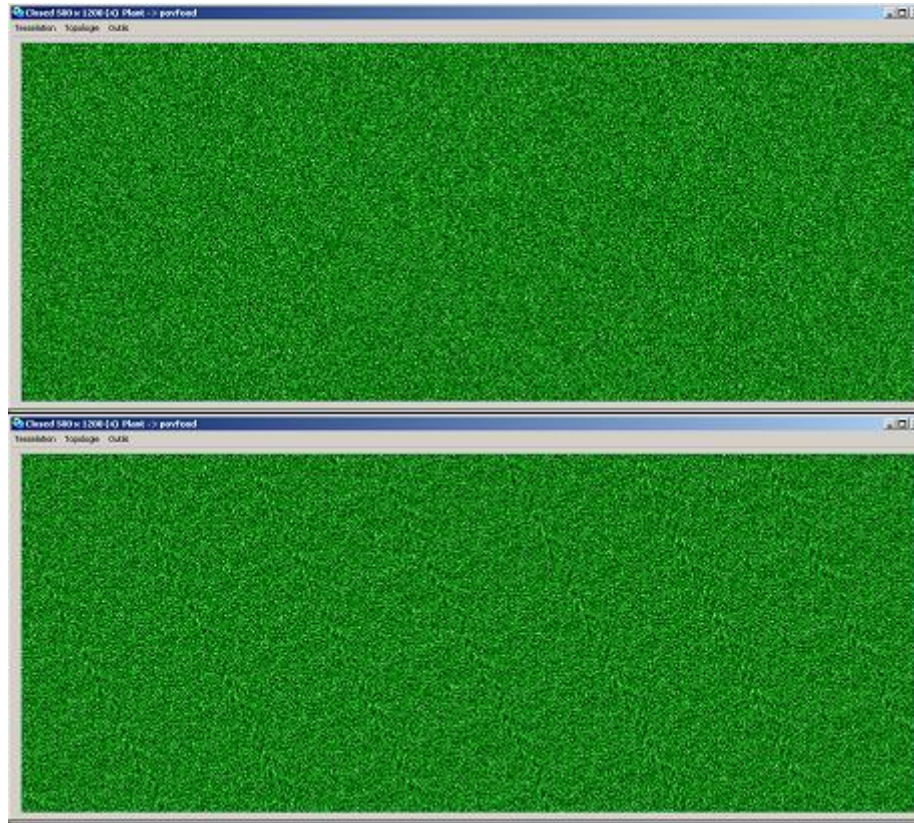


Figure 9-2 : Deux vues d'une même grille de 500x1200 cellules (600.000 cellules). La valeur de chaque cellule est initialisée aléatoirement par un nombre entre $]0 ; 1[$ et un gradient de couleur verte est appliqué pour visualiser le résultat. La grille du haut a été initialisée en utilisant le générateur de Fishman et Moore [Fishman & Moore, 1985]. La grille du bas utilise le générateur de FastRandom de [Press et al., 1986].

Pour des grilles de grandes tailles, le générateur FastRandom [Press et al., 1986] fournit par défaut dans Smalltalk laisse voir des régularités liées à la taille "réduite" de sa période, quand le générateur de Fishman et Moore [1985] semble satisfaisant. Mais on peut aussi noter que tester sur une seule dimension, les différences entre ces générateurs ne sont pas visibles et il faut des tests statistiques sophistiqués pour les discerner. Aussi, si l'on ne souhaite pas se restreindre au niveau "d'identité numérique" de réplication, la qualité du générateur de nombres pseudo-aléatoires ne semble pas déterminante pour expliquer des différences possibles entre deux implémentations d'un modèle où les agents seraient brassés aléatoirement avant d'être activés.

9.1.7 Problème récurrent de la gestion du temps et des interactions

Comme le souligne [Meurisse, 2004], "une des visions possibles du succès de Sugarscape dans le domaine réside dans la facilité potentielle de reproduction des phénomènes décrits et observés dans le livre". Pourtant, les expériences de réplifications de ce modèle (ou de ses sous-parties) ont montré les difficultés d'en reproduire les résultats ([Lawson et Park, 2000], [Meurisse, 2004], [Michel, 2004], [Bigbee et al., 2005], [Axelrod, 1997] et [Axelrod, 2003]).

Pour toutes ces ré-implémentations de Sugarscape, comme pour l'expérience de [Rand & Wilensky, 2006] ou celle de [Galan & Izquierdo, 2005], la gestion du temps et des interactions constituent un problème sensible, source de résultats divergents. Au sujet de l'ordonnancement des activations d'agents de Sugarscape, R. Axelrod [2003] note que :

In the model of cultural change that we studied, the agents were activated at random. When this model was implemented in Sugarscape, the agents were sampled without replacement, meaning that each agent was activated once before any agent was activated a second time. In the original implementation of the model (Axelrod, 1997), the agents were sampled with replacement. This seemingly minor difference in the two versions of the model made a noticeable difference in some very long simulation runs. Had the model not been replicated, the effect of the sampling decision would not have been appreciated.

Comme je l'ai expliqué au chapitre 5.3.4.3 (Phénomènes oscillatoires inexplicables ?), les expériences de [Lawson et Park, 2000] et [Michel, 2004] se sont focalisées sur l'impact de différentes gestions du temps (simulation par événements ou par horloge). En particulier, ils ont cherché à comprendre les raisons des oscillations fortes de population dans la version à "pas de temps" constants. Leurs conclusions sont divergentes. [Lawson et Park, 2000] considèrent que la gestion événementielle doit être privilégiée car elle permet un amortissement des oscillations. [Michel, 2004] réfute ces conclusions et explique que l'homogénéité des conditions initiales couplée aux contraintes spatiales du système sont à l'origine des phénomènes oscillatoires. Il conclut que le mode synchrone exacerbe les biais de simulations, quand le mode événementiel permet de les gommer progressivement par le fait de l'activation asynchrone des agents.

Toujours est-il que la gestion du temps et les modes d'activation des agents restent un point sensible souvent sources de problèmes de réplication. Il est donc important de décrire précisément leur fonctionnement.

9.2 ATTENTION PARTICULIERE DANS LA DESCRIPTION DES MODELES

"L'enseignement visuel doit se fonder sur le principe que toute représentation constitue un énoncé. L'image présente non pas l'objet lui-même, mais un ensemble de propositions relatives à cet objet; ou, si l'on préfère, elle représente l'objet sous la forme d'un ensemble de propositions"

Rudolf Arnheim, "La pensée visuelle" [Arnheim, 1969]

9.2.1 Une nouvelle phase dans le cycle de la modélisation

Les quelques exemples énoncés précédemment permettent de mesurer les difficultés à répliquer des modèles multi-agents. La majorité des remarques émises à ce sujet portent sur le manque de spécifications, en particulier sur le mode d'activation des agents et la gestion des interactions. Il est donc indispensable, après la réalisation d'un simulateur, de décrire à nouveau clairement le modèle. C'est également la conclusion développée par Edmons [2000] qui appelle à une modélisation plus descriptive.

Dans le domaine du génie logiciel, les spécifications apparaissent comme le point de départ de la conception de tout programme. Plusieurs cycles sont proposés pour la description complète du processus : cycle de vie en cascade, en V, en spirale, développement incrémental ou méthode Merise, voire extrême programming. Le but de ce découpage est de maîtriser les risques, les délais et les coûts, tout en assurant une qualité conforme aux exigences.

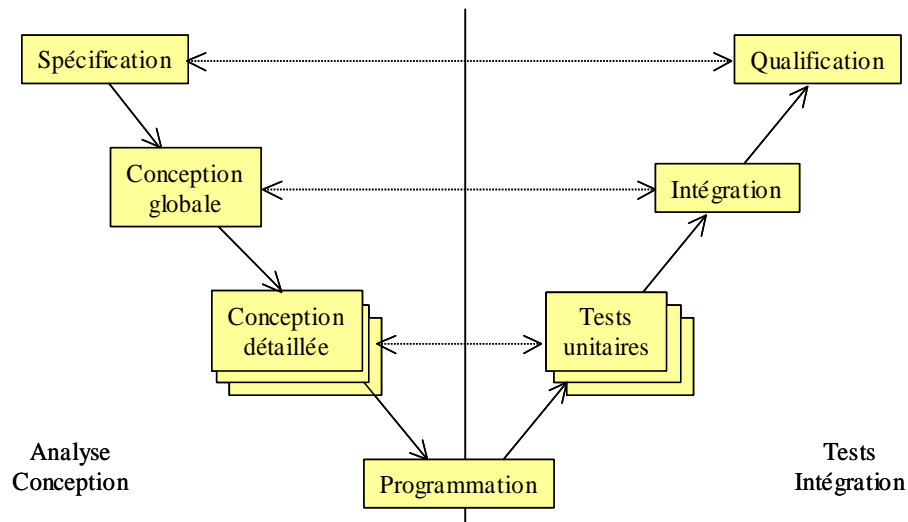


Figure 9-3 : Cycle de vie en V d'un logiciel.

Cette représentation de la vie d'un logiciel n'est pas sans rappeler celle de [Meurisse, 2004] à propos de son cadre méthodologique de modélisation (cf. chap. 4.6.2, p. 91). Mais cette vision standard de la vie d'un logiciel, bien adaptée à la production de logiciels, n'est pas suffisante pour la modélisation multi-agent. Car, encore une fois, l'objectif n'est pas d'avoir un bon simulateur, mais d'exposer clairement un point de vue cohérent sur un objet d'étude par le truchement d'un modèle conceptuel, les simulations n'étant que les conséquences de ce point de vue. En effet, la séparation nette entre le modèle et le simulateur ainsi que la nécessité de répliques indépendantes obligent à augmenter ce schéma classique de cycle de vie du modèle. Comme je l'ai montré dans [Bommel, 1997b], il faut considérer la modélisation comme un processus d'apprentissage sans fin. A la lumière de ce qui vient d'être présenté, on enrichit le développement en spirale de la connaissance (cf. chap. 2.7.2, p. 52) par un schéma plus détaillé tel que présenté sur la figure suivante :

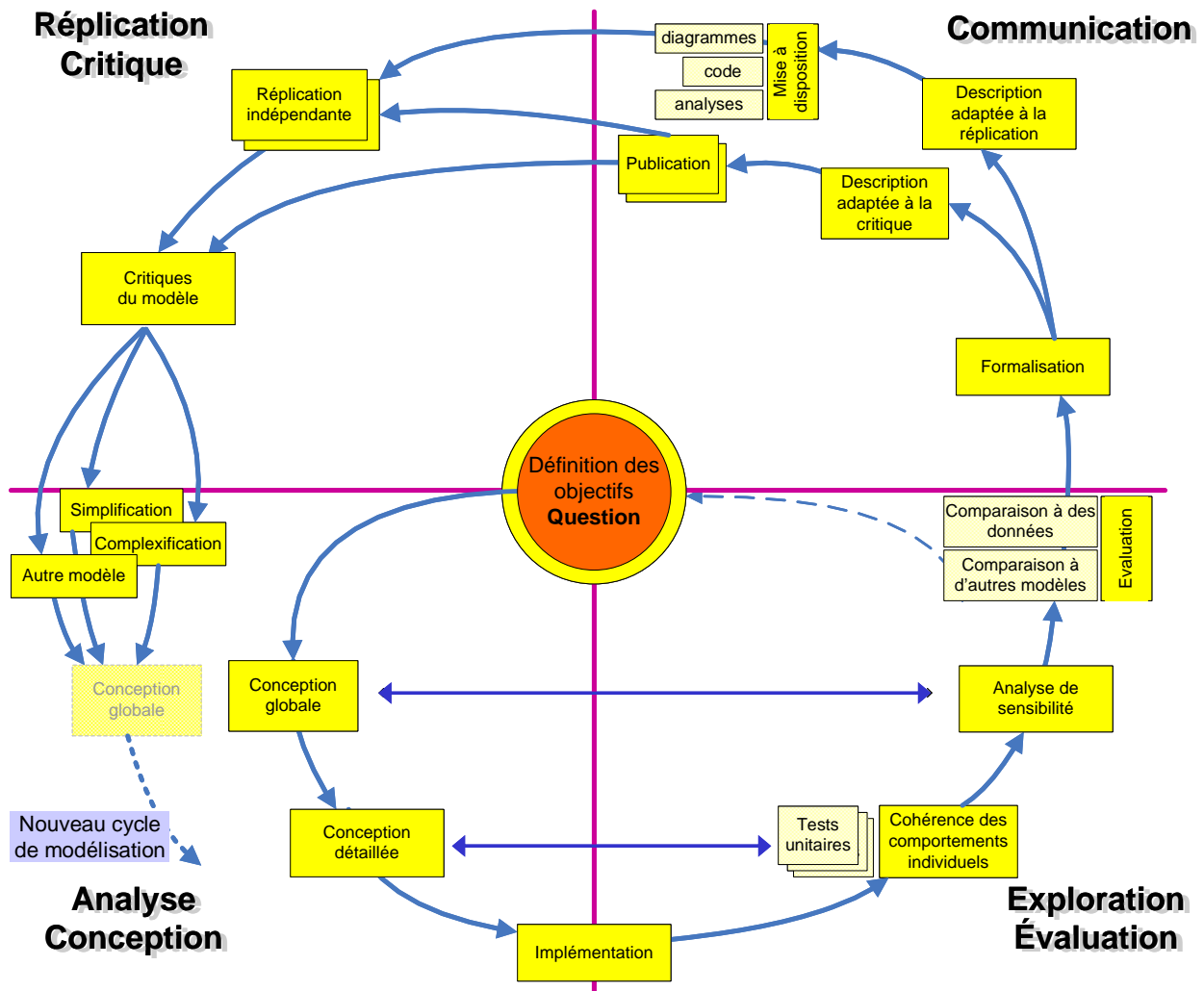


Figure 9-4 : Cycle de vie d'un modèle multi-agent.

Je ne reviendrai pas ici sur les aspects exploration du simulateur et réplication qui viennent d'être abordées au chapitre précédent. Voici quelques explications.

9.2.1.1 Définition des objectifs et conception

"Je n'ai fait cette lettre-ci trop longue que parce que je n'ai pas eu le temps de la faire plus courte."

Blaise Pascal

Les premières phases du cycle de vie d'un modèle sont semblables à celles de la conception d'un logiciel. Il est en effet indispensable de commencer par la "définition des objectifs" (cf Chap. 2) puis la "conception globale" sans toucher au code. Sans cela, le temps de l'implémentation du simulateur risque d'être très long mais aussi risque de nuire à sa qualité.

La "conception détaillée" s'attache à décrire le fonctionnement du modèle en fonction d'un langage de programmation et d'une plate-forme de simulation ciblée. Le modèle, conçu lors de la phase précédente, est adapté pour s'intégrer au "framework". Des détails sur son fonctionnement sont rajoutés à ce stade.

Enfin, à partir de spécifications claires pour l'équipe, la phase d'implémentation devient finalement plus rapide que la phase de conception.

9.2.1.2 La communication

Si, après l'exploration du simulateur et l'évaluation du modèle, les résultats ne conviennent pas, il faut revenir sur les phases de définition des objectifs et de conceptions pour déterminer ce qui a fait défaut. On entamer ainsi un second tour de la boucle.

Par contre, si après ce travail d'évaluation, les résultats semblent légitimes, le cycle n'est pas bouclé pour autant. Il faut revenir sur les diagrammes qui ont servi à la conception du modèle et les retravailler pour pouvoir les présenter. En effet, au cours de ce processus, l'image que le concepteur s'est forgée de son objet d'étude a forcément évolué. Il lui faut désormais présenter un modèle du modèle : une compréhension schématique de sa structure et de son fonctionnement.

De plus, cette nouvelle image, cette connaissance réinterprétée doit être transmise pour pouvoir être appréciée et discutée, voire critiquée. Evidemment, la critique peut sembler difficile à recevoir, mais la remise en question de certitudes reste le meilleur moyen de faire progresser la connaissance. Une critique constructive est plus efficace qu'un discours confus et ambigu.

De mon point de vue, les critiques récurrentes qui touchent à la "validation" des SMA ont pour origine essentiellement l'aspect irréfutable de ces modèles. "Irréfutable" dans le sens de pas assez descriptifs, trop cachés et trop compliqués pour pouvoir les critiquer. Il paraît donc fondamental d'ouvrir ces boîtes noires pour permettre la réfutation⁹⁴.

Les modèles mathématiques standards reposent sur un formalisme abouti et fiable qui leur procure une grande force. Or ce n'est pas encore le cas des modèles multi-agents. Il est donc nécessaire d'apporter le plus grand soin à la description. Sans pour autant proposer de techniques révolutionnaires mais en utilisant des outils déjà existants, on peut parvenir à mieux décrire nos modèles. Or étant donné la place limitée que l'on dispose dans les articles scientifiques, il faut trouver une stratégie d'explicitation, pour (i) énoncer le nouveau point de vue et le rendre falsifiable et (ii) pour permettre la réplication.

La première et la plus indispensable des stratégies est de publier, quitte à décomposer la description en plusieurs articles⁹⁵. L'objectif de cette conduite consiste à présenter le modèle de la façon la plus claire possible. Si le modèle est très simple, on pourra concevoir cette publication comme un moyen d'en permettre la réplication. Mais s'il est compliqué, cet idéal ne pourra certainement pas être atteint. La description doit alors être concise et non ambiguë. Il est alors préférable de se concentrer sur des parties déterminantes du travail quitte à en omettre d'autres. Quoiqu'il en soit, il faut reprendre les diagrammes initiaux, choisir ceux qui paraissent les plus importants et les adapter à une publication en enlevant certains détails.

La deuxième stratégie d'explicitation consiste à présenter un modèle dans l'idée d'en permettre la réplication par des tiers. Si le modèle est un peu compliqué, les publications ne suffisent pas ; il faut penser à d'autres supports pour présenter l'ensemble des diagrammes et ses explications : pages web, littérature grise, etc.

⁹⁴ Réfutation : Démonstration qui combat une thèse pour en montrer les faiblesses ou la fausseté. Fait de réfuter : contrer un argument, une thèse. Rejeter un raisonnement en en démontrant la fausseté par des preuves contraires ; démontrer la fausseté de ce que quelqu'un affirme (voir chapitre 1.3.2.4, "Le falsificationisme")

⁹⁵ [Grimm & Railsback, 2005] (chap. 10) conseillent quatre publications ciblées :

- Un article uniquement de description du modèle (pour les IBM en écologie, ils citent *Ecological Modelling*, *Natural Resource Modelling* ou *Ecology and Society*) qui peut être publié dans des rapports de littérature grise, voire même sur un site web bien que cette dernière référence ne puisse pas être citée dans des publications.
- Un article traitant uniquement de l'application du modèle à des problèmes de gestion et proposant une analyse critique de ces résultats (rapports techniques, conférences et journaux de gestion).
- Des discussions méthodologiques sur la conception et l'utilisation d'un modèle.
- Un article traitant uniquement des analyses du modèle

9.2.2 Protocole ODD

La difficulté de présenter un modèle ainsi que l'hétérogénéité des descriptions ont amené un collectif de chercheurs en écologie à proposer un protocole afin de mieux exposer les modèles individu-centrés et en harmoniser les présentations [Grimm et al., 2006a]. Car, estiment-ils, les descriptions des IBM (ou SMA) sont difficiles à lire, incomplètes, ambiguës et moins accessibles que les modèles analytiques. En conséquence, une meilleure communication des SMA augmente leur crédibilité scientifique.

Ce protocole⁹⁶, nommé ODD (pour Overview, Design concepts and Details), consiste en trois parties décrivant progressivement le modèle. Ces étapes ne sont pas sans rappeler celles de la phase de conception d'un logiciel (analyse des besoins, conception générale et conception détaillée). Elles sont composées de sept éléments, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 9-1 : Les trois parties et les sept éléments du protocole ODD, d'après [Grimm et al., 2006].

Overview	Purpose
	State variables and scales
	Process overview and scheduling
Design concepts	Design concepts
Details	Initialization
	Input
	Submodels

Ces sept éléments doivent présenter :

L'objectif du modèle (*purpose*). Cet élément paraît évidemment indispensable car il fournit un cadre pour toute la description du modèle. Il faut également insister sur le fait que cette mise en perspective permet aux lecteurs de comprendre pourquoi certains aspects du système étudié ont été ignorés.

Les échelles et les variables d'état (*state variables and scales*). Ici les exemples disponibles fournis par [Grimm et al., 2006b], montrent généralement une description textuelle de la structure du modèle, les noms des attributs des entités et, souvent, un tableau affichant les valeurs et les unités de ces paramètres. Paradoxalement, il n'y a aucun diagramme de classe en UML parmi les 19 exemples de ce livre. Les auteurs expliquent qu'UML est compliqué et propose beaucoup de types de diagrammes qui sont trop difficiles à concevoir et à comprendre. UML est destiné aux ingénieurs en informatique et reste trop complexe pour les chercheurs d'autres disciplines. Ils proposent néanmoins de se limiter aux diagrammes les plus basiques et les plus simples et de réfléchir à un semblant d'UML adapté aux modèles à base d'agent : un langage déclaratif et visuel. Nous reviendrons au chapitre suivant sur ces aspects.

Vue d'ensemble des processus et de la gestion du temps (*process overview and scheduling*). Dans cette partie, il s'agit de présenter la modélisation du temps de manière générale : gestion continue, discrète ou événementielle; les processus de synchronisation; la gestion des actions concurrentes; l'ordre d'activation des agents pour la gestion par horloge. Beaucoup d'applications du protocole ODD parmi les exemples disponibles utilisent des diagrammes de flux. A ce sujet, les auteurs notent :

Of all elements of a model description, "scheduling" is the least developed one and, in fact, is simply left out in many descriptions. Verbal descriptions are usually not sufficient to describe the ordering of

⁹⁶ L'idée initiale de ce protocole fut proposée par [Grimm & Railsback, 2005] (chap. 10) et discutée avec les participants d'un workshop en Norvège, en 2004.

processes in a model. Flow charts certainly are useful and easy to grasp, but for any scheduling deviating from a linear sequence of processes, pseudo code that exactly corresponds to the code used for simulations should be provided. [ibid.]

Les grands concepts (design concepts). Cet élément du protocole contient une liste de plusieurs points touchant à des questions diverses dont voici quelques exemples :

- Y a-t-il de l'aléatoire ? A quel endroit et pour quelle raison ?
- Les agents sont-ils regroupés en collectifs réifiés ?
- Quels phénomènes émergent des interactions et quels sont ceux qui sont imposés ?
- Comment les agents prennent-ils leurs décisions ? Comment imaginent-ils le future ? etc.

L'initialisation traite de la façon dont est instancié le système : est-ce toujours le même état ? Les valeurs initiales sont-elles choisies arbitrairement ou à partir de jeux de données ?

Les variables d'entrées (Inputs). Il s'agit de spécifier si les dynamiques de certaines variables sont imposées (variables de forçage). Un exemple typique peut être les précipitations ou les températures qui fluctuent au cours du temps, non pas calculées par le modèle, mais alimentées par des données externes.

Les sous-modèles (Submodels). Cette partie est rarement présentée dans une publication car elle est souvent trop longue. Elle reprend dans le détail tous les points listés dans "les grands concepts". Ici, toutes les équations doivent être exposées et commentées. On doit aussi expliquer comment les valeurs des paramètres ont été choisies et comment le modèle a été calibré.

Ce protocole a été testé sur 19 modèles en écologie. Il a été conçu dans l'objectif de répliquer les modèles. Les auteurs espèrent que le protocole ODD entre progressivement dans les mœurs et facilite la lecture des modèles.

Bien que prévu préférentiellement pour les modèles de l'écologie, [Pohill et al., 2008] ont testé ce protocole et ont montré qu'il pouvait s'appliquer aux modèles d'agents sociaux et LUCC.

9.2.3 UML

9.2.3.1 D'un outil de conception de programmes vers un langage universel de dialogue et d'échange entre disciplines

UML (Unified Modeling Language) [OMG, 2003] est un langage graphique de modélisation objet. "Unified" signifie qu'UML réalise la fusion des précédents langages de modélisation objet ayant influencé la modélisation objet dans les années 90 : Booch, OMT, OOSE⁹⁷. Principalement issu des travaux de Grady Booch, James Rumbaugh et Ivar Jacobson, UML est devenu un standard depuis qu'il a été accepté par l'OMG (Object Management Group) en 1997. Il a d'ailleurs été adopté par la communauté industrielle dans le cadre général de la modélisation des systèmes au sens large (qui ne sont pas forcément en informatique) :

The Unified Modeling Language is a language for specifying, visualizing, constructing, and documenting the artifacts of software systems, as well as for business modeling and other non-software systems.[ibid.]

Le pouvoir de représentation d'UML en fait un sujet de choix pour formaliser et spécifier des modèles multi-agents. Mais comme le souligne [Ferber, 2006],

⁹⁷ Plus de 50 méthodes objet ont vu le jour durant la période 90-95: Booch, Classe-Relation, OMT, OOA, OOD, OOM,... Seules 3 méthodes ont véritablement émergé: La méthode OMT ("Object Modeling Technics") de James Rumbaugh (1990-1991), la méthode BOOCH'93 de Grady Booch (OOD) et la méthode OOSE ("Object Oriented Software Engineering") d'Ivar Jacobson (1992). Après une première fusion de BOOCH-OMT, OOSE a ensuite été intégré.

L'inconvénient d'UML est d'ailleurs d'être parfois trop précis en termes d'implémentation, ce qui ne permet pas de rester à un niveau suffisamment conceptuel, c'est-à-dire au niveau du modèle. [...] L'intérêt de la notation UML est d'être très parlante et surtout d'offrir un langage commun compréhensible facilement à la fois par les informaticiens et les modélisateurs. C'est la raison pour laquelle ce type de notation se développe beaucoup dans le domaine de la modélisation multi-agent. Néanmoins, elle présente un inconvénient certain : celui de confondre l'aspect modélisation et implémentation en intégrant dans un même diagramme des aspects très différents. C'est pourquoi il est utile de proposer une grille de lecture plus générale que ne peut le faire l'approche objet.[Ferber, 2006]

En effet, est-ce la course industrielle aux AGL (Ateliers de Génie Logiciel) qui cherchent à produire la génération automatique de code⁹⁸ ou le penchant naturel des informaticiens, qui entraînent une confusion des genres ? Toujours est-il que l'objectif originel d'UML est souvent oublié au profit de représentations déviées vers un langage informatique ciblé. Et pourtant, [OMG, 2003] spécifie clairement que :

The primary design goals of the UML are as follows:

- *Provide users with a ready-to-use, expressive visual modeling language to develop and exchange meaningful models.*
- *Support specifications that are independent of particular programming languages and development processes. [...] [ibid.]*

Il faut résister aux dérives de l'utilisation d'UML pour les seules applications informatiques et revenir à ces deux premiers objectifs précités. Le plus important à mes yeux est le premier qui consiste à fournir un langage graphique des modèles pour les échanger et les discuter, non pas entre informaticiens mais entre personnes travaillant ensemble sur un objet d'étude quelconque. L'indépendance du formalisme vis-à-vis de tout langage informatique fait également parti des pré-requis d'UML. Cette façon d'aborder UML permet de l'enseigner à des apprentis modélisateurs qui ne connaissent pas l'informatique. Ainsi, depuis quelques années maintenant, beaucoup d'articles sur les SMA s'appuient sur des diagrammes UML (essentiellement des diagrammes de classes) pour décrire leur modèle. Malgré cet effort, une certaine fascination pour les outils informatiques semble demeurée. En effet, dans beaucoup d'articles encore, on rencontre des diagrammes qui laissent transparaître le code et la plate-forme cible. Comme nous l'exprimions dans [Le Page et Bommel, 2004] :

Whatever the targeted platform, the UML diagrams are used to explain a model and they have to be independent from the platform and the computer language. Indeed, an ABM described with UML is an abstract representation that gives a simplified picture of the real world. Because UML is based on simple graphic notations, with UML diagrams, an ABM should be understandable even by non-computer scientists. UML may be seen as a dialogue tool that should facilitate communication among scientists, modellers, and stakeholders.

Ce qui devrait être la caractéristique d'UML c'est davantage l'"Universal" que l'"Unified" pour revenir à un véritable langage de représentation des connaissances. Langage de modélisation, UML doit être considéré comme un outil de dialogue entre les experts, les thématiciens, les acteurs du développement et parfois les informaticiens [Bommel et Müller, 2007]. Il faut donc l'appréhender comme un langage universel pour rapprocher les disciplines. C'est ce souhait qu'exprimait déjà F. Morel, dès 1978, en dressant un tableau sur les relations de la physiologie à la modélisation. Il concluait alors de façon remarquable :

⁹⁸ Pourtant comme il est spécifié dans la documentation officielle, l'objectif d'UML n'est pas de remplacer à terme un langage de programmation : "The UML, a visual modeling language, is not intended to be a visual programming language, in the sense of having all the necessary visual and semantic support to replace programming languages" [OMG, 2003].

"C'est pourquoi, la collaboration entre physiologistes de tous horizons d'un côté, informaticiens et biométriciens de l'autre, restera nécessaire et souhaitable encore longtemps. Mais pour être pleinement efficace, cette collaboration suppose que les interlocuteurs des deux camps parcourent les uns comme les autres une partie du chemin qui les sépare trop souvent. Il est essentiel en effet que chacun s'exprime dans un langage accessible à ses partenaires, ne serait-ce que pour pleinement appréhender les limites et les possibilités des approches respectives des uns et des autres." [Morel, 1978]

9.2.3.2 Formaliser pour dialoguer avec d'autres disciplines

"Un bon dessin vaut mieux qu'un long discours"

Proverbe

E. Ramat considère que chaque formalisme est adapté à une famille de système :

"Considérer le formalisme de modélisation comme uniquement un moyen de formaliser le modèle et le développement du simulateur est indépendant de la formalisation. Cette approche de la simulation a un avantage : il permet de définir un simulateur qui est dans la plupart des cas plus efficace. En revanche, on ne dispose plus alors de spécification formelle de l'implémentation du modèle".[Ramat, 2006]

Pour le paradigme objet, caractérisé par les notions d'encapsulation, d'héritage et de polymorphisme, UML se prête bien à une modélisation d'entités discrètes ainsi qu'à la mise en place de scénarios d'interactions entre ces entités [Libourel, 2003]. Mais comme je l'ai expliqué au chapitre 4.4 ("une expérience incompressible", p. 82), la formalisation ne peut s'abstraire des simulations. En effet, lors de l'étude d'un système formel, on s'attendrait à pouvoir inférer le comportement dynamique du système sans le simuler. Or, même pour les modèles mathématiques standards, cet idéal est généralement inaccessible dès que le système devient un tant soit peu réaliste [Pavé, 1994]. A l'instar d'autres formalismes plus rigoureux, UML n'échappe pas à cette règle. Il serait illusoire d'espérer s'abstraire des simulations pour expliquer l'espace complet des comportements d'un modèle⁹⁹.

Par ailleurs, la lecture d'un diagramme UML exige un certain degré d'interprétation. D'où la qualification de langage "semi-formel", qui selon B. Morand ne constitue pas un handicap en soi :

The diagram [...] can not be purely symbolic since it contains indexes and icons. [...] the modeling language can neither be strictly formal as far as it offers a description of the world objects. The advance allowed by UML, as well as its future developments, lies as much in its capacity to supply a notation shared by an entire community of analysts, designers and users, as in its strictly formalized nature. The «semi-formal» qualifier, approximate and autocontradictory, illustrates this situation. [Morand, 1998]

Longtemps après ses travaux sur la cybernétique, H.A. Simon montre que pour un contenu équivalent, le diagramme est préférable à un texte : "diagram is worth ten thousand words" [Larkin et Simon, 1987]. En regroupant les informations et en les localisant à des endroits judicieux, un diagramme évite une longue recherche des éléments d'un texte (forcément séquentiel) et fournit une vision globale du système.

"Diagrams can be better representations not because they contain more information, but because the indexing of this information can support extremely useful and efficient computational processes." [ibid.]

⁹⁹ A ce sujet, R. Duboz explique "qu'il en est de même pour DEVS. Il est possible de connaître localement le comportement d'un modèle atomique en dessinant un graphe de transitions d'états par exemple, qui illustre bien la dynamique du modèle. Néanmoins, si le modèle est plus complexe, alors cette représentation (possible dans l'absolu) devient vite incompréhensible et ne donne aucune information sur l'ensemble des états possibles du système. C'est pourquoi la simulation est, assez généralement, le seul recours pour l'étude de la dynamique des systèmes complexes" [Duboz, 2004].

Dans la lignée des travaux de Pierce (1839 - 1914) sur la sémiotique¹⁰⁰, B. Morand a réfléchi sur les propriétés cognitives des diagrammes. Il explique qu'une représentation par diagrammes conduit à centrer les phénomènes cognitifs sur la perception et "possède des vertus particulières : visualisation, immédiateté, spatialité, créativité, conformité à l'intuition" [Morand, 2000]. En s'appuyant sur des expériences en psychologie et en neurologie, il conclut que "le diagramme se trouve au cœur du processus cognitif et non pas à la périphérie" [ibid.]. Ainsi, en reprenant la devise de Paul Valéry qui considère que "nous ne raisonnons que sur des modèles"[cité dans Le Moigne, 1990], on peut affirmer que "nous pensons par diagramme".

En exagérant le raisonnement, on peut même dire qu'un modèle conceptuel est forcément un modèle diagrammatique¹⁰¹.

"From a conceptual point of view, information, diagrams and models are identical in nature: they are signs. Informing is making new information by means of information and this process genesis reveals a pure sequence of formalizations". [Morand, 1998]

Par conséquent, contrairement à ce que publient [Grimm et al., 2006a] qui en excluent l'utilisation dans le protocole ODD, UML peut être très utile pour décrire la structure et les comportements d'un modèle. Il faut s'en servir comme d'un langage déclaratif et visuel, compréhensible par tous et bien adapté aux modèles multi-agents.

Pour cela, il est nécessaire de respecter le formalisme spécifié par UML : beaucoup d'erreurs existent encore dans les articles qui ne respectent pas toujours la norme : inversion des cardinalités, absence des rôles, confusion entre variables de classe et constante, etc. Or c'est le respect de ces règles de notations qui permet d'en lever les ambiguïtés (UML peut être vu comme une grammaire). Dans le même temps, il est nécessaire d'éviter des surcharges d'informations qui rebutent le lecteur. Car un diagramme doit rester concis et simple pour éclairer le propos¹⁰². Ce grand écart, entre le respect des normes et le besoin de concision, est difficile à gérer, mais c'est la clé du succès. C'est pour cette raison que, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, [Larkin et Simon, 1987] concluent que :

"Although every diagram supports some easy perceptual inferences, nothing ensures that these inferences must be useful in the problem-solving process. Failing to use these features is probably part of the reason why some diagrams seem not to help solvers, while others do provide significant help" [ibid.].

Un bon diagramme doit donc être lisible par tous et rapidement compréhensible pour donner du sens. Un bon diagramme doit être réfutable.

9.2.3.3 Exemples de diagramme UML pour publication

- Re-conception de Dricol par des non-informaticiens

¹⁰⁰ La sémiotique est l'étude des signes et de leur signification. Contrairement à la sémantique, elle ne se limite pas à comprendre le sens des mots, mais elle étudie tous les types de signes ou de symboles. Elle étudie également le processus de signification en tant que tel, c'est-à-dire la production, le codage et la communication des signes.

¹⁰¹ La diagrammatique est l'étude du rôle dynamique joué par les diagrammes. Pour un aperçu plus complet, voir [Letellier, 2005].

¹⁰² C'est aussi la raison pour laquelle je ne conseille pas l'utilisation d'outil de rétro-ingénierie (reverse engineering) qui génèrent des diagrammes UML à partir du code informatique, car :

- Le code est une interprétation du modèle et des artifices d'informaticien qui peuvent faciliter le codage ne doivent pas apparaître dans le diagramme;
- une implémentation à partir d'une plate-forme génère des informations sur celle-ci,
- le diagramme n'est pas suffisamment structuré pour faciliter sa lecture et renforcer sa sémantique,
- des informations contenues dans le code sont inutiles pour la compréhension

Depuis quelques années, notre cours sur la modélisation des systèmes complexes s'est enrichi d'une partie conséquente consacrée à UML. Cet ajout s'est fait au détriment de l'enseignement de Smalltalk pour le codage des modèles. Destiné pourtant à des non-informaticiens, cette nouvelle configuration du cours a été très bien accueillie et s'avère maintenant une des parties fondamentales aux dires des stagiaires eux-mêmes.

Bien conçu, un diagramme UML peut donc être compris par des non-spécialistes. Mais cette simplicité apparente nécessite un long et difficile travail de conception et de concertation. Ainsi, au cours de ces sessions de formation, nous expérimentons des ateliers de conception participative. Ces exercices débutent par l'étude d'un texte publié sur un modèle. En accompagnant l'exercice, tout en restant en retrait, nous (formateurs) proposons de formaliser le modèle présenté. Toujours très riches et animées, ces sessions révèlent souvent des manques et des ambiguïtés dans la description des modèles publiés. Mais au final, après de longues discussions, les diagrammes élaborés satisfont l'ensemble des participants et s'avèrent lisibles et compréhensibles à tous.

L'exemple suivant, issu d'un de ces ateliers de re-conception, illustre ce travail. Il a été conçu à partir d'un article de [Thébaud & Locatelli, 2001], lui-même inspiré d'un article de [Sudgen, 1989]. Le modèle, nommé Dricol, présente l'émergence de conventions entre collecteurs de bois mort qui s'échouent sur les plages de la côte du Yorkshire suite à des tempêtes au large de l'Angleterre. L'objectif est de tester la pression des pairs et l'émergence implicite de règles de gestion de ressources communes¹⁰³.

Pour accompagner un diagramme et faciliter son interprétation, il est nécessaire de le décrire par un texte court. Le diagramme ci-dessous est décrit de la façon suivante :

Des morceaux de bois apportés par la tempête sont disséminés sur une plage. Des collecteurs observent leur environnement, se déplacent, collectent le bois dans leur hotte. Lorsque celle-ci est pleine, ils en déposent le contenu en un tas qu'ils forment sur la plage. Chacun marque la propriété de son tas par une pierre. Cette convention peut être examinée d'un point de vue économique : comme elle permet d'éviter une perte de temps à surveiller le bois, elle augmente l'efficacité de la collecte par rapport à une situation de libre accès.

Une fois leur hotte vidée, les collecteurs reprennent leur recherche pour augmenter leur tas. Lorsque son tas de bois dépasse un certain seuil, le collecteur devient respectueux de la propriété. Il va non seulement respecter les tas des autres collecteurs, mais aussi imposer ce respect aux autres : tout collecteur se trouvant dans son rayon de visibilité respectera les tas. Mais, si le tas d'un collecteur respectueux vient à être pillé et repasse en dessous du seuil, son propriétaire redevient irrespectueux.

Le diagramme de classe suivant illustre ce petit modèle :

¹⁰³ We can be sure that the inhabitants of a fishing village would not have appealed to law courts or police to enforce a custom about driftwood. Somehow this rule was self-enforcing [Sudgen, 1989]

Un effort important a donc été consacré à la réalisation et à la mise en page de ce diagramme. Bien sûr, d'autres vues sont nécessaires pour mieux décrire les dynamiques et les comportements (D'autres diagrammes sont disponibles sur la page "Dricol" du site Cormas : <http://cormas.cirad.fr/en/applica/dricol.htm>). Mais cet effort me paraît essentiel car le diagramme présenté ici ne ressemble pas à ceux qui ont été conçus par les auteurs pendant les phases d'analyse et de conception. Celui-ci a pour unique objectif de décrire le modèle : il a été conçu uniquement en vue de faire passer un message à d'autres qui n'ont pas participé à la conception.

Dans le cas de descriptions d'activités, il faut également concevoir des diagrammes comme des moyens de rendre intelligibles des pratiques complexes sans les réduire à quelques opérations simples [Morales et al., 2005]. Dans les expériences qu'a menées H. Morales avec les exploitants agricoles en Uruguay, les diagrammes UML ont été utilisés avec succès comme outils pour communiquer, permettant des explications claires et non ambiguës. En suivant les recommandations de [Checkland, 1999], il paraît utile de suivre la règle « sept plus ou moins deux » activités ou classes au moment de construire les diagrammes pour qu'ils soient facilement compréhensibles pour des tiers.

- TransAmazon

Le Chapitre 11 et l'annexe 4 décrivent ce modèle avec de nombreuses vues UML ainsi que l'application du protocole ODD.

9.3 CONCLUSION : PENSER PAR DIAGRAMME

Il est nécessaire, *après* la réalisation d'un simulateur, de décrire à nouveau le modèle par un ensemble de diagrammes (ou de vues) pour en présenter les différents aspects. Ceci correspond à une nouvelle phase dans le cycle de la modélisation. Chaque vue doit avoir du sens et ainsi faire la lumière sur un des aspects du modèle. Il ne s'agit donc pas de présenter simplement un diagramme issu des phases de conceptions ou généré automatiquement par un outil de rétro-ingénierie mais d'en reprendre soigneusement la structure et la mise en forme.

Reconnaître avec [Morand, 2000] que "le diagramme est au cœur du processus cognitif et non pas à la périphérie", oblige à prendre en compte le rôle essentiel que les diagrammes UML jouent pour concevoir un modèle mais aussi pour le présenter aux autres. Bien que les diagrammes UML soient de plus en plus présents dans les publications, beaucoup restent encore difficilement compréhensibles, confus et laissent transparaître le code cible et la plateforme sur laquelle le modèle a été implémenté. Pour contrer le courant de défiance vis-à-vis des SMA et pour arrêter de les considérer comme des boîtes noires aux résultats suspects, il me paraît indispensable de mieux décrire les modèles. Il faut donc considérer UML comme un outil de dialogue entre disciplines. Pour cela, il est nécessaire de retravailler les diagrammes issus des phases de conception pour les épurer davantage. Il faut présenter des modèles graphiques, simples et compréhensibles par tous. En particulier, il faut s'attacher à évacuer toute relation avec un langage informatique, une plateforme et des classes techniques (interface, buffer, base de données, etc.). Le langage utilisé ne doit appartenir qu'au domaine modéliser pour ne pas impressionner les non-informaticiens. Ces diagrammes leur sont destinés, pour qu'ils puissent les comprendre, se les accaparer et les critiquer. Peut-être même que certains tenteront alors d'en répliquer les simulateurs...

Chapitre 10

CONCLUSION : DES MODELES SIMPLES, FIABLES, EXPLICITES ET REPRODUCTIBLES POUR RETROUVER LA COMPLEXITE

*J'ai toujours essayé de dissimuler mes efforts, j'ai toujours souhaité que
mes œuvres aient la légèreté et la gaieté du printemps qui ne laisse jamais
soupçonner le travail qu'il a coûté.*

Henri Matisse, lettre à Henry Clifford - 14 février 1948

La modélisation multi-agent demeure un exercice difficile pour lequel il n'existe pas actuellement de méthodologie préétablie et où les approches formelles restent difficiles à appliquer [Klügl et al., 2002]. Arrivé au terme de cette thèse, il est donc important de rappeler les principaux problèmes qui peuvent apparaître lors de la conception, de la présentation et de l'utilisation d'un SMA. Car, si la validation reste un sujet délicat à prendre avec circonspection pour tout type de modèle, il n'en demeure pas moins que les questions spécifiquement liées à la fiabilité des modèles multi-agents apparaissent comme la principale source de fragilité des SMA. Ce chapitre tente d'en faire la synthèse.

Hormis ces problèmes de fiabilité et de transparence, il existe d'autres inconvénients. N'imposant pas de limites, les SMA offrent la possibilité de complexifier sans fin les modèles. Ceci est problématique car les chances de faire apparaître des erreurs ou des artéfacts augmentent avec la complexification. En outre, la description claire du modèle devient rapidement impossible. Il est très difficile de communiquer les concepts et de les partager avec d'autres. L'absence de transparence empêche alors toute critique. Mais c'est surtout le rêve de "représenter la réalité" qui pose problème. Il est vain de vouloir recréer un monde virtuel semblable au réel. Au-delà de la question de la complexité, il est illusoire de chercher la neutralité car un modèle est un point de vue sur le monde, forcément subjectif.

C'est pourquoi, je défends une approche prudente de la modélisation non pas par rejet des approches plus sophistiquées telles que les agents cognitifs mais parce que ces outils présentent de nombreux pièges cachés qui, s'ils ne sont pas traités correctement, risquent de nuire à la qualité des modèles présentés et, à terme, peuvent conduire à la dépréciation du domaine des SMA.

Ce chapitre fait donc la synthèse des diverses difficultés qui peuvent surgir lors de l'exercice de la modélisation multi-agent et explique les raisons de mon opposition à des modèles descriptifs et complexes.

10.1 FAIBLESSES DES MODELES MULTI-AGENTS

10.1.1 Un SMA révèle des propriétés non prouvables

Une simulation informatique ne peut donner qu'un fait de calcul. De plus, les résultats obtenus dépendent de l'intégralité du cheminement de la simulation. Il n'existe pas de raccourci permettant de la résumer. Or il est nécessaire de pouvoir décrire et affirmer les propriétés d'un SMA. A l'opposé, un système d'équations est un "être mathématique" qui fournit non seulement des faits de calcul, mais surtout qui autorise souvent une *démonstration* porteuse de sens sur le résultat. En

reconnaissant ces difficultés, R. Axtell explique que prouver les propriétés d'un SMA consiste à identifier sa robustesse [Axtell 2000]. Pour cela, il est nécessaire de faire varier les paramètres et les configurations initiales afin de tester cette robustesse. On objectera alors qu'il est matériellement impossible de faire une analyse exhaustive de toutes les configurations possibles d'un SMA. Il faut donc reconnaître que ces outils ne permettent pas de démontrer les conséquences générales d'un modèle.

Pourtant, même s'il s'avère effectivement impossible de mener une analyse exhaustive, une analyse de sensibilité bien menée, comme nous l'avons montrée au chapitre 8, permet de limiter les critiques soulevés par C. Lobry à l'égard des SMA (cf. chap. 4). Car même si ses règles de fonctionnement sont totalement connues, un modèle multi-agent reste encore un objet d'investigation expérimentale. Il est donc indispensable d'étudier ce comportement par des expérimentations, pour tenter éventuellement d'en produire une forme de théorie plus compacte ou, en d'autres termes, de concevoir un modèle du modèle.

10.1.2 Boîte noire

Lors de présentations d'un SMA, on constate fréquemment une ambiguïté du discours qui mélange le modèle et le simulateur (chap. 4.6.1). Trop souvent, on parle d'un modèle en faisant directement référence à son implémentation. La mise à disposition du code informatique permet (normalement) de jouer avec le simulateur et de vérifier certains de ses résultats. Mais pour bien apprécier le modèle dans son ensemble, il faut passer par l'étape longue et difficile de l'analyse du code. Rares sont ceux qui se prêtent à cet exercice rédhibitoire. Aussi, les SMA sont souvent perçus comme des boîtes noires¹⁰⁵.

Evidemment, un SMA n'apparaît pas comme tel pour son concepteur, du moins il faut l'espérer. Mais pour les autres, c'est à dire ceux qui n'ont pas participé à la conception et qui n'ont pas pris le temps d'en décortiquer les mécanismes, un SMA est souvent considéré comme tel. Par conséquent, et sans même aborder les problèmes de divergence implémentatoire, la description claire, complète et non ambiguë d'un modèle reste un point essentiel pour le domaine de la modélisation multi-agent. Or, malgré la présence accrue de diagrammes UML dans les articles, les modèles restent encore trop mal décrits. Un bon modèle UML doit être descriptif et compréhensible par tous afin d'être critiqué, voire réfuté et parfois même être répliqué. D'ailleurs, les outils de rétro-ingénierie ne nous évitent pas un long travail de remise en forme pour fournir une représentation épurée d'un modèle, plus claire et synthétique.

Un effort important de description des modèles doit être engagé afin de les présenter sous forme de diagrammes simples et compréhensibles par tous. Dans cette optique, UML, reconnu comme un standard, peut jouer un rôle précieux. D'un outil pour la conception de SMA, il doit être considéré comme un outil de dialogue entre disciplines.

¹⁰⁵ J. Ferber ne partage pas tout à fait ce point de vue sur la notion de boîte noire lorsqu'il écrit :

Le modélisateur "pratique des expérimentations, déplaçant des individus, changeant leur comportement, modifiant les conditions environnementales. De ce fait, son modèle, sa vision du système cible s'élabore au fur et à mesure. Elle n'est pas issue d'une abstraction d'un monde réel, mais d'une reconstruction, d'une recreation d'un monde artificiel. Il élabore des hypothèses et peut les tester « in vitro » en utilisant les mêmes types d'observation que dans le monde réel. Il peut alors lancer des expérimentations et exploiter les données obtenues lors de ses expérimentations, les agréger, leur appliquer des traitements statistiques afin de vérifier les hypothèses émises. Ainsi, à la différence des approches classiques, un SMA n'est pas une boîte noire, et la simulation multi-agents ne se réduit pas à l'implémentation d'un modèle et à l'analyse de sa réponse en fonction des paramètres d'entrées, mais participe au processus de recherche de modèles." [Ferber, 2006]

10.1.3 Gestion délicate du temps et des interactions

10.1.3.1 Pas de règle certifiée

Le problème de la gestion du temps et des interactions reste un point délicat que de nombreux modélisateurs ne perçoivent pas. Or, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents (5 à 7), les conséquences de ces gestions peuvent influencer fortement les comportements d'un modèle. Mais ceci n'est pas toujours le cas. On peut classer les modèles selon les types d'interactions qu'ils mettent en œuvre :

- Pour certains modèles (type *Termites*), l'évolution globale des simulations ne dépend pas du choix d'une gestion du temps. Chaque traitement peut influencer une configuration locale (la forme précise d'un agrégat de copeaux ou l'itinéraire d'un termite), mais sans altérer la trajectoire générale.
- Pour d'autres modèles mettant en œuvre des interactions indirectes entre agents de type compétition (modèle "Consommation d'une ressource commune"), le choix d'une gestion des interactions peut influencer les résultats des simulations pour certaines parties du modèle (zone intermédiaire par exemple). Or ces zones sensibles se trouvent souvent être les parties les plus intéressantes à étudier. Si un brassage aléatoire des agents semble souvent acceptable, ce choix ne constitue pas une règle absolue.
- Enfin, les modèles constitués d'agents en situation d'interactions directes (*Sugarscape*, *Mopa*, filières) sont fréquemment sensibles à la façon de gérer le temps et les interactions. Il est alors nécessaire d'aborder ces traitements avec le plus grand soin car leur mise en œuvre n'est pas neutre : elle fait partie intrinsèque du modèle.

Si certains comprennent l'importance de ces phénomènes et les intègrent explicitement dans leur modèle, d'autres ne sont pas même conscients des conséquences que peuvent entraîner ces gestions. Il faut alors rester sceptique sur les conclusions qu'ils tirent de leurs travaux.

10.1.3.2 Brassage aléatoire systématique ?

Pour éviter les artéfacts liés à l'ordonnancement uniforme des agents, nombreux sont les auteurs qui préconisent un mélange aléatoire de l'activation des agents :

"Happily, by randomizing the order of agent activation from period to period it is usually possible to remove all artifacts of this type and thus avoid any spurious correlation." [Axtell, 2001]

Pour affirmer cela, Axtell s'appuie sur une analyse d'un modèle de stabilité des firmes [Axtell, 1999] qu'il étudie en comparant les "régimes d'activation" des agents, soit par brassage systématique de la liste des agents ("random activation"), soit par "activation uniforme" (50% de la liste est brassée à chaque période). Les résultats de ses expériences dévoilent des réponses contradictoires : si le premier régime d'activation aléatoire favorise la stabilité des taux de croissance des firmes les plus importantes, l'activation uniforme montre le résultat inverse, ce qui est contraire aux observations. En insistant sur l'importance de considérer ces "détails architecturaux", Axtell conclue que "l'activation aléatoire donne des résultats empiriquement significatifs" quand l'activation uniforme conduit à des résultats peu réalistes [Axtell, 2001].

Mais comme je l'ai montré avec le modèle de diffusion du feu (fig. 5-20, p. 116) ou de l'utilisation d'une ressource commune, cette proposition d'Axtell ne convient pas systématiquement et le modélisateur doit prêter une attention particulière à cette difficulté. La randomisation des activations n'est pas toujours sans conséquence et ne doit pas être la règle à suivre obligatoirement en matière de gestion du temps. De même, l'application systématique du principe "Influences-Réaction" ne constitue pas une solution miracle pour gérer tout type d'interaction. En fonction de l'objectif, de la question posée et des types d'interactions en jeu, le modélisateur doit choisir des traitements du temps et des interactions appropriés à son travail. Il doit les présenter explicitement car ils font partie intégrante du modèle.

10.1.3.3 Outil pour analyser différentes stratégies de gestion

Outre les problèmes liés à l'activation des agents, on peut aussi s'intéresser à l'ordonnancement des actions au sein même d'un agent. En répliquant Sugarscape, T. Meurisse [2004] constate que

le cas de l'ordonnancement intra-agent ne semble pas traité, ou du moins non spécifié dans le livre de référence de Sugarscape. Toutefois, et nous avons essayé de le montrer, cette omission dans les spécifications des simulations influe grandement sur les résultats de simulation.

Aussi, après avoir prouvé l'importance des différentes stratégies d'activation des agents, Meurisse énonce également que "l'ordonnancement se doit d'être exprimable par le modélisateur et non pas enfoui dans le code de la solution opérationnelle de l'outil de simulation" [ibid.]. Pour cela, il propose alors un outil à base de composants pour gérer les comportements des agents et leurs dépendances temporelles. Cet outil graphique, appelé CGraphGen (pour Concurrent Graph Generation), permet au modélisateur de préciser l'ordre d'activation des agents (ordonnancement inter-agent) mais aussi l'ordre d'exécution de leurs comportements (ordonnancement intra-agent). Il est basé sur la réification des méthodes de comportement d'un agent qui sont encapsulées sous la forme de composants informatiques manipulables. Ainsi, plutôt que d'avoir des lignes de codes cachées et pas toujours évidentes à comprendre, cet outil permet de manipuler à la souris l'ordonnancement des méthodes de base des agents. Les figures suivantes illustrent deux exemples de cet outil appliqués à l'activation de comportements élémentaires d'agents de Sugarscape.

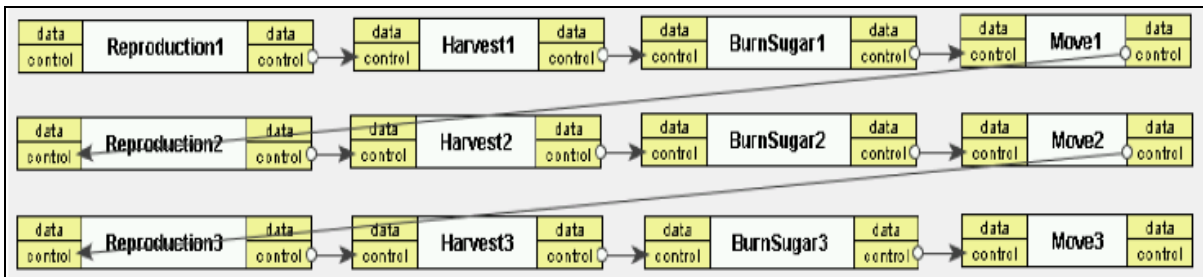


Figure 10-1 : Application de l'outil CgraphGen à l'ordonnancement de comportements d'agents de Sugarscape. Ordonnancement séquentiel de trois agents exécutant chacun quatre opérations élémentaires. D'après [Meurisse, 2004].

Face à des solutions bien souvent implicites, Meurisse espère ainsi que la possibilité d'explicitier facilement sa stratégie d'activation favorise une prise de conscience de la part du modélisateur sur l'influence de ses choix.

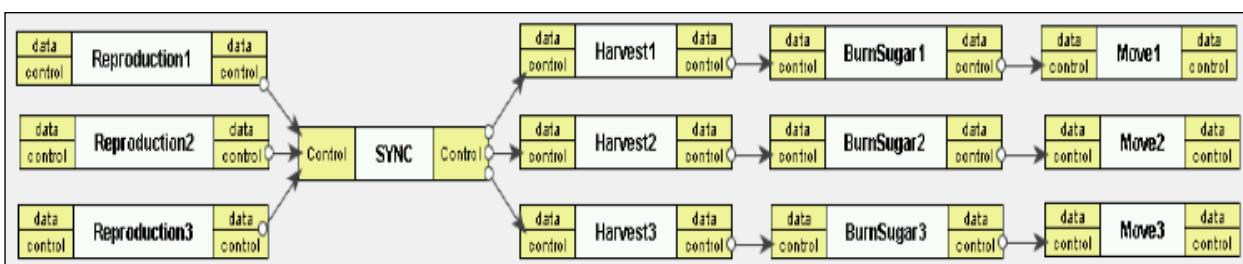


Figure 10-2 : CgraphGen : activations en parallèle de trois comportements de reproduction, puis après synchronisation, exécution en parallèle de trois opérations élémentaires. D'après [Meurisse, 2004].

La dernière figure montre des processus concurrents de trois agents. Mais comme annoncer au chapitre 5.3.6, le multi-threading ne donne que l'illusion de processus parallèles : les comportements *harvest*, *burnSugar* et *move* se dérouleront à des rythmes différents pour chaque agent. En particulier, le traitement du déplacement *move* ne résout pas le problème du conflit pour accéder à un même lieu.

10.1.4 "The ghost in the model"

La gestion du temps et des interactions n'est pas la seule source d'erreur d'un SMA. Il en existe bien d'autres dont les problèmes de calcul numérique exposés ici.

En informatique, la façon standard de représenter les nombres non entiers repose le plus souvent sur l'utilisation de nombres à virgule flottante. Elle est conçue pour créer l'illusion de manipuler des nombres réels. Mais en vérité, ces nombres sont des approximations de nombres réels. En effet, une machine ne peut travailler qu'avec un ensemble fini de chiffres.

La plupart du temps, les calculs exécutés avec des nombres à virgule flottante produiront des résultats attendus par la logique mathématique. Mais, dans certaines situations, les résultats peuvent être fortement trompeurs. Dans des formats de nombres à virgule flottante binaires utilisés par la plupart des ordinateurs, des nombres comme 0,1 – 0,2 – 0,3 et 0,4 ne sont pas exactement représentables par un nombre binaire à 32 bits (simple précision). Cela signifie que des erreurs peuvent se glisser au moment même où nous saisissons de tels nombres. Le tableau suivant indique les valeurs de ces réels en simple et double précision, calculées selon la norme IEEE (l'Institute of Electrical and Electronics Engineers a développé un Standard for binary Floating-Point Arithmetic, ANSI/IEEE Standard 754 - 1985).

Réel	simple précision (32 bits)	double précision (64 bits)
0,1	9.9999994e-2	1.0000000000000000e-1
0,2	1.9999999e-1	2.0000000000000000e-1
0,3	2.9999998e-1	3.0000000000000000e-1
0,4	3.9999998e-1	4.0000000000000000e-1
0,5	5.0000000e-1	5.0000000000000000e-1

Pour la réplication des calculs scientifiques d'une machine à une autre, la norme IEEE a été établie. La quasi-totalité des architectures d'ordinateurs actuelles incluent donc une implémentation matérielle des calculs selon cette norme, directement dans le microprocesseur, garantissant une exécution rapide (par rapport au calcul à virgule fixe).

Pour représenter un réel, la norme IEEE décrit un nombre à virgule flottante de la façon suivante : un réel r est représenté par un triplet $s.m.2^e$, où 2 est la base de représentation binaire, $s \in \{0, 1\}$ est le signe, m est appelé la mantisse entière (parfois appelée significande) et e est un exposant. Des variations de e font "flotter" la virgule décimale. Ainsi sur 32 bits (simple précision), r s'écrit en virgule flottante binaire :

$$r_{(décimal)} \rightarrow (-1)^s \cdot (1,m) \cdot 2^{(e-127)}_{(binaire)} \quad 106$$

¹⁰⁶ En simple précision (32 bits), s occupe 1 bit, m prend 23 bits et e 8 bits. L'exemple suivant montre le calcul de 0,1 en nombre binaire à virgule flottante. Le réel 0,1 (en décimal) donne 0,0001 1001 1001 1001 1... en binaire à virgule fixe :

0,1 x 2 = 0,2 < 1 => on pose **0** : 0,1 = 0,0
 0,2 x 2 = 0,4 < 1 => on pose **0** : 0,1 = 0,00
 0,4 x 2 = 0,8 < 1 => on pose **0** : 0,1 = 0,000
 0,8 x 2 = 1,6 ≥ 1 => on pose **1** : 0,1 = 0,0001
 (1,6-1) x 2 = 1,2 ≥ 1 => on pose **1** : 0,1 = 0,00011
 (1,2-1) x 2 = 0,4 < 1 => on pose **0** : 0,1 = 0,000110
 0,4 x 2 = 0,8 < 1 => on pose **0** : 0,1 = 0,0001100
 0,8 x 2 = 1,6 ≥ 1 => on pose **1** : 0,1 = 0,00011001 ...

Ici 0,1 décimal est égale à 0,00011001 avec une précision de 2^{-8} . On vérifie cela de la façon suivante :

Les calculs en virgule flottante sont pratiques, mais leur précision est limitée et traduit par des arrondis qui peuvent s'accumuler de façon gênante. Par ailleurs, la manipulation de ces nombres en suivant des règles mathématiques peut entraîner des erreurs par rapport aux attendus théoriques. Ainsi, contrairement aux calculs sur les réels, les calculs en virgule flottante ne sont pas associatifs. Par exemple, dans un calcul en flottants en double précision, $(10^{50}+1)-10^{50}$ ne donne pas 1, mais 0. La raison est que $10^{50}+1$ est approximé par 10^{50} ¹⁰⁷.

Les SMA ne sont pas les uniques "privilegiés" de ces problèmes qui touchent de nombreux domaines de l'informatique : [McCullough & Vinod, 1999] ont inventorié ce type de problèmes pour des logiciels d'économétrie. Plus grave encore, des erreurs d'arithmétique liées aux virgules flottantes sont à l'origine de la catastrophe d'Ariane 5.

Pour les SMA, ces erreurs surviennent lorsque l'on souhaite manipuler des nombres réels en suivant des principes arithmétiques. Ainsi, en Smalltalk, le calcul du niveau d'énergie d'un agent donne des résultats différents selon la façon dont on met en œuvre ce traitement. Le code suivant montre deux exemples de traitements qui devraient mathématiquement être équivalents :

```
| energy |
energy := 1.2.
energy := energy - 0.4.
energy := energy - 0.4.
energy := energy - 0.4
```

Le résultat final de 'energy' n'est pas 0, mais un nombre très proche : 5,96046e-8.

En procédant de la façon suivante :

```
| energy |
energy := 1.2.
energy := energy - (3*0.4)
```

On obtient le résultat arithmétiquement exact, 'energy' = 0,0.¹⁰⁸

$0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 0 \times 2^{-3} + 1 \times 2^{-4} + 1 \times 2^{-5} + 0 \times 2^{-6} + 0 \times 2^{-7} + 1 \times 2^{-8} + \dots = 0 + 0 + 0 + 0 + 1/16 + 1/32 + 0 + 0 + 1/256 + \dots = 0,0625 + 0,03125 + 0,00390625 + \dots = 0,09765625 \dots$

Or, 0,00011001 en binaire = $1,1001.2^{-4}$ (2^{-4} opère un décalage de 4 chiffres vers la gauche après la virgule). Sur 23 bits, 0,1 vaut alors $(1,10011001100110011001100) \cdot 2^{-4}$. La mantisse $m=10011001100110011001100$ et, en fonction du nombre de bits affectés à l'exposant (8 bits en simple précision), le décalage est de $2^{n-1}-1 = 2^7-1=127$. Nous constituons l'exposant : $\text{exposant} = -4 + \text{décalage} = 123 = 1111011$ en binaire. Donc,

0,1 décimal s'écrit $(-1)^0 \times 2^{1111011-1111111} \times (1+0, 10011001100110011001100)$ en virgule flottante binaire, soit en décimal : $(-1)^0 \times 2^{-4} \times 1.5999999 = 9.9999994 \cdot 10^{-2}$ avec une erreur de $6 \cdot 10^{-6} \%$.

¹⁰⁷ Ce n'est pas le cas de Smalltalk qui utilise automatiquement la classe LargePositiveInteger pour traiter ces problèmes.

¹⁰⁸ Le passage en double précision ne résout pas le problème :

```
energy := 1.2 asDouble.
energy := energy - 0.4 asDouble.
energy := energy - 0.4 asDouble.
energy := energy - 0.4 asDouble
```

On obtient encore un résultat faux, 'energy' = 2.9802322387695d-8. Une solution pour trouver un résultat exact tout en gardant le même traitement, consiste à passer par des fractions :

```
energy := 1.2 asRational.
energy := energy - 0.4 asRational.
energy := energy - 0.4 asRational.
energy := energy - 0.4 asRational
```

Cet exemple illustre bien que les lois de l'arithmétique ne sont pas toujours respectées en informatique courante. De plus, la possibilité d'obtenir des erreurs de calcul peut survenir très rapidement et même en utilisant des nombres très simples. Les modèles utilisant particulièrement des embranchements de la forme *si...alors...* sont fréquemment vulnérables à l'accumulation de ce type d'erreurs de calcul. Dans certains cas, les conséquences conduisent à des phénomènes incompréhensibles sans une analyse poussée. C'est ainsi que [Polhill et al. 2005] constatent la présence d'agents fantômes dans leurs simulations : des agents qui ne sont pas morts mais qui ne sont plus répertoriés par l'ordonnanceur. En même temps, leur présence dans l'environnement gêne et modifie le comportement des autres agents. Des articles sont spécialisés dans l'identification de ces phénomènes et apportent des solutions : [Belding, 2000], [Izquierdo & Polhill, 2006].

10.1.5 Passage par le codage

Hélas, le codage paraît encore indispensable pour implémenter un simulateur et peut facilement devenir une porte ouverte au bricolage. Des plates-formes telles que Mobidyc (<http://www.avignon.inra.fr/mobidyc>) permettent de s'en abstraire mais au prix d'un effort laborieux pour acquérir un autre formalisme qui me semble tout aussi long à maîtriser. Quant aux AGL (Ateliers de Génie Logiciel), ils permettent à partir de diagrammes de classes de générer des squelettes de code, c'est-à-dire les packages, les classes, les attributs et les signatures des méthodes. Mais les corps des méthodes doivent toujours être écrits dans le langage cible pour mettre en œuvre toute la machinerie : comportement des agents, méthodes de l'ordonnanceur, mais aussi, instanciation et mise en place des liens entre les objets lors de la phase d'initialisation du simulateur. Or, c'est précisément cette partie du développement qui est sujette à erreur de codage plutôt que la mise en place de la structure du modèle.

La traduction d'un modèle conceptuel en un simulateur est la cause de ce que F. Michel appelle des *divergences implémentatoires*. Il explique qu' "il existe un manque flagrant de correspondance entre les spécifications des modèles multi-agents et les structures informatiques qui permettent de les exécuter". Il ajoute que "l'implémentation d'un simulateur multi-agents est beaucoup plus complexe qu'il peut paraître a priori et que de multiples facteurs sont susceptibles d'engendrer des biais de simulation difficilement identifiables".

Par ailleurs, [Standish, 2006] montre que plus de 50% des lignes de code d'une application scientifique ne sont pas directement dédiées au calcul scientifique, mais servent uniquement à des tâches périphériques et néanmoins indispensables : affichage des résultats, sauvegarde, analyse, etc.

L'utilisation d'une plate-forme de simulation multi-agent permet donc de libérer une part importante des contraintes de codage. A condition qu'elle respecte au minimum le principe MVC¹⁰⁹, une bonne plate-forme doit permettre au modélisateur de se concentrer uniquement sur son sujet sans se soucier des accessoires qui accompagnent un simulateur.

Mais, à l'exception de rares plates-formes comme Mobidyc, NetLogo ou Mimosa (qui permettent de s'abstraire d'une part du codage pour des modèles simples), le passage par le codage reste encore une étape obligatoire dans la mise en place d'un simulateur. Des outils à base de composants permettent maintenant d'implémenter des algorithmes simples, mais pour des opérations un peu plus compliquées, la maîtrise d'un langage de programmation semble plus efficace.

¹⁰⁹ MVC, pour Modèle-Vue-Contrôleur, est un modèle d'architecture de logiciel qui spécifie une séparation claire entre le code du modèle et la façon de le visualiser et de le manipuler. Ce modèle d'architecture a été conçu en 1979 par Trygve Reenskaug [Reenskaug, 2003], qui travaillait alors sur la conception de Smalltalk avec Alan Kay, Dan Ingals, Ted Kaehler, Adele Goldberg au Palo Alto Research Center de Xerox.

10.1.6 Complexification sans fin

L'approche objet n'impose pas de limites et permet d'ajouter toujours plus d'éléments et de relation dans un modèle dont la structure peut rapidement devenir très compliquée. Ceci peut facilement conduire à la création d' "usines à gaz" (ou "modèles-cathédrales" selon [Thery 2002]) souvent obscures voire incontrôlables. Si cette possibilité est permise et facilitée par l'approche objet, elle ne constitue pas une particularité exclusive des SMA. D'autres formes de modélisations plus standards peuvent également produire des monstres ingérables. Ainsi, le modèle d'équilibre général mondial, cher aux économistes, peut présenter dans sa version à 13 régions jusqu'à 300.000 équations¹¹⁰ !

Selon Giorgio Israel [1996], la modélisation mathématique du monde inclut "la vieille ambition, toujours vivante et agissante, de réaliser une description mécanique et réductionniste unifiée du monde, une ambition qui résiste à toutes les difficultés et à tous les échecs". Si en mathématique, cette ambition nécessite des compétences pointues, il n'en est pas de même pour la programmation orientée objet qui autorise une complexification des modèles sans plus de difficultés que celles nécessaires à l'acquisition d'un langage de programmation.

Avec de tels outils, grande est la tentation de pousser toujours davantage le réalisme d'un modèle pour finalement se perdre dans un travail sans fin. Mais cette opinion n'est pas partagée par tous et il me faut expliquer les raisons d'une telle défiance vis-à-vis des modèles-cathédrales.

10.2 KISS OU KIDS ?

10.2.1 Préambule : l'efficacité n'implique pas la complexité

10.2.1.1 Goliath...

« The Earth Simulator », l'ordinateur le plus puissant au monde, a été conçu, comme son nom l'indique, pour comprendre et prévoir les fluctuations et les évolutions du système Terre via la modélisation numérique. Si l'objectif initial était de faire tourner des modèles de météorologie [Sato, 2004], Tetsuya Sato, le directeur du Earth Simulator Center, explique que :

"With Earth Simulator, we are now able to search in territories where no intellectual creation of human kind was ever possible, being able to understand the Earth with all factors entangling together simultaneously, from micro process of how clouds or snow has been formed, to macro process of atmospheric circulation, as just the way Earth is. I call it the Holistic Simulation."

On remarque que l'ambition d'un tel projet ne se limite plus à l'étude des phénomènes météorologiques mais qu'il aspire à la simulation de la Terre dans son ensemble (simulation holistique). Introduire une complexité comparable à la réalité du système terrestre nécessite évidemment des moyens extraordinaires et la mise au point d'un calculateur ultra puissant. En expliquant que le réductionnisme, bien qu'ayant permis de comprendre certains fonctionnements de la nature, est "faible pour prévoir le futur", Tetsuya Sato aspire à une nouvelle ère de la science tournée vers la simulation pour la prédiction, car maintenant "les hommes ont acquis un outil qui peut révéler l'évolution future du système dans son ensemble" :

The Earth Simulator (ES) is the first scientific tool that has given a quantitative jump in simulation science. It is the first powerful supercomputer that has made it possible to simulate the evolution of an entire system at once. Because of this treatment of the entire system, the future evolution of a

¹¹⁰ [Boussard et al., 2005] expliquent qu'il est rare que le modèle fonctionne plus d'une dizaine d'année car "au-delà le système d'équations à résoudre n'a plus de solution en raison des difficultés de calcul numérique liées à la trop grande variabilité des prix". De plus, comme expliquer précédemment, le temps est représenté par un artifice qui consiste à considérer qu'un objet identifié à deux moments différents constitue en fait deux objets différents. A chaque année supplémentaire que l'on souhaite simuler, il faut alors rajouter 30.000 équations.

system can be predicted by simulation, and hence the future world is turned from Science Fiction into Science Reality.[...] The fact that simulation enables us to deal with an entire system at once means that human beings have, at last in its long history, become owners of a telescope that can « see » the future.

Mais, quelques temps après les débuts d'un projet si ambitieux, Tetsuya Sato remarque que malgré ce calculateur ils ne peuvent traiter toute la complexité du monde :

we have discovered almost all fundamental (elementary) laws that are governing the activity of the current universe, except the evolutionary equations of life. Although we have devoted all our efforts to developing mathematical tools to know and formulate the mechanism of revealed elementary laws, we have unfortunately left behind us our enthusiasm of invention of the tool to know the future evolution. This is because the future is not that simple and is a complex manifestation resulting from closely and highly tangled numerous elementary laws. [Sato, 2005]

Cependant, loin de remettre en cause un tel projet, l'auteur aspire à davantage de moyens pour multiplier encore la puissance de calcul :

This is because to deal with two cooperating organizations simultaneously and self-consistently requires connection of some hundred millions of Earth Simulator scale computers, namely, an ultra-massively connected simulators system. [ibid.]

Même si cette expérience est intéressante, on peut sourire d'un tel projet qui peut paraître comme une fuite en avant, vers toujours plus de puissance de calcul. Par contre, cette ambition affichée de prétendre *prédire* l'avenir du monde, me semble plus gênante. Elle conduit à penser que nous pouvons proposer un modèle neutre d'une complexité comparable à la *réalité*, comme si cette réalité était donnée de façon objective. Le modèle du grand Tout reste une chimère.

10.2.1.2 ... ou David ?

A l'opposée de ces travaux, d'autres voies de recherche sont envisageables. Contrairement à l'approche cognitive par exemple, les SMA réactifs reposent sur l'idée qu'il n'est pas nécessaire de concevoir des agents ayant une architecture interne complexe de haut niveau pour finalement obtenir un comportement que l'on puisse qualifier d'intelligent [Brooks, 1991, Drogoul, 1993]. L'exemple suivant illustre ce propos.

Quelles sont les conditions favorables à l'apparition de la coopération entre individus dans un monde d'égoïstes en l'absence de pouvoir central ? C'est par cette question que débute le célèbre ouvrage « The Evolution of Cooperation » de Axelrod [1984]. Pour s'attaquer à ce problème, Axelrod a lancé un tournoi basé sur le Dilemme du Prisonnier Itératif [Axelrod et Hamilton, 1981]. Lors d'un premier tournoi ouvert aux spécialistes de la théorie des jeux, la stratégie 'Tit-for-Tat', soumise par le professeur de psychologie Anatol Rapoport, a remporté la compétition devançant 14 autres programmes bien plus longs et complexes. La grande simplicité de 'Tit-for-Tat' consiste à débiter la partie en coopérant puis en répétant le coup précédent de l'autre joueur. Fort des enseignements de cette première compétition, Axelrod décida d'organiser un second tournoi ouvert, cette fois-ci, à quiconque en précisant que n'importe qui pouvait proposer n'importe quelle stratégie et voir dès lors plusieurs stratégies identiques dans le pool de départ. Rapoport présenta à nouveau sa stratégie. Sur les 63 programmes en compétition, 'Tit-for-Tat' fut vainqueur une fois de plus.

Cette simplicité n'était pourtant pas gagnée d'avance car avant le déroulement de ces tournois, personne n'osait prédire la meilleure stratégie. Mais surtout, une stratégie coopérative, si simple, face à des stratégies toutes plus sophistiquées les unes que les autres, semblait perdue d'avance¹¹¹. Oser proposer une telle stratégie relève du génie.

¹¹¹ En s'inspirant de la stratégie Tit-For-Tat, Axelrod suggère quatre règles simples pour s'en sortir honorablement dans toute forme d'interaction sociale itérative et durable : 1°) Être bienveillant au départ ("le "win-win" commence

Ainsi, des mécanismes simples peuvent produire des résultats insoupçonnés, efficaces et très robustes.

10.2.2 KIDS

Même si dans les faits, la devise KISS (Keep It Simple as Stupid) n'est pas toujours respectée, la majorité des scientifiques s'accorde à dire qu'il est préférable de concevoir des modèles simples. Or, à contre-courant de cette pensée dominante, Bruce Edmonds a rédigé une série d'articles dans lesquels il explique que la simplicité ne constitue pas un gage de vérité [Edmonds, 2000b], [Edmonds, 2002]. Il considère que généralement, un modèle se situe entre les quatre pôles exprimant des critères de satisfaction d'une modélisation.

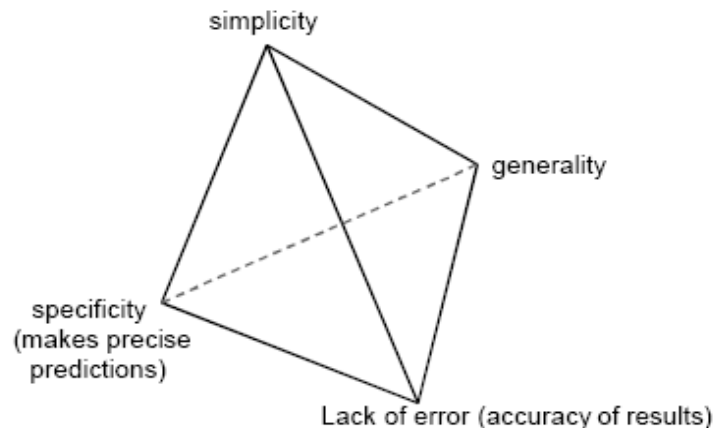


Figure 10-3 : les quatre pôles exprimant des critères de satisfaction d'une modélisation, d'après [Edmonds, 2002].

When modelling complex systems and phenomena, not only are more models going to be required but each of the models will need to be more complex. The presence of complexity and chaos means that the detailed interactions of a system's parts can make a significant difference to the outcomes. If this is the case then a formal model that captures this detail is likely to be analytically intractable. [...] A detailed simulation model that is more descriptively accurate, i.e. that captures the detail of the processes involved, may be far more preferable than a 'general' analytic model that smoothes these away. [Edmonds, 2005]

A partir de ces réflexions, il propose avec Scott Moss, une approche de la modélisation qu'ils intitulent KIDS, pour "Keep It Descriptively Stupid". Dans l'article intitulé "From KISS to KIDS",

toujours par la coopération"). 2°) Être réciproque : dès que l'autre cesse de coopérer, le "win-win" en fait autant. 3°) Être indulgent : le "win-win" pardonne tout de suite et revient à la coopération dès le coup suivant. 4°) Ne pas vouloir être trop malin : le "win-win" a un comportement clair et donc prévisible. À court terme, il peut se faire rouler. Mais sur le long terme et face à une diversité de stratégies, il emporte régulièrement le morceau. "Joss", le seul programme ayant souvent emporté des manches contre le "win-win", jouait comme lui la coopération mais tentait de temps en temps, de façon aléatoire, un petit coup qui lui rapportait beaucoup de points. Mais face à des programmes plus agressifs, il finissait par se faire écraser.

A ces règles, on peut rajouter un conseil : ne pas être trop envieux [Labrousse, 1998]. En effet, nous avons l'habitude de réfléchir en termes de jeu à somme nulle (échecs, football...). Dans ces contextes, il y a un vainqueur et un perdant, mais jamais deux vainqueurs. Dès lors, un concurrent doit faire nécessairement mieux que l'autre pour pouvoir l'emporter : la victoire passe obligatoirement par la défaite de l'autre. Or, la plupart des interactions sociales ne sont pas des interactions de ce type mais ressemblent plus à un Dilemme du Prisonnier. Ici, le but du jeu est de maximiser ses gains. Cependant, nous avons tendance à recourir à un critère de classification inappropriée en ce qui concerne la consigne de départ. Soit nous comparons notre score à celui des autres participants, soit nous le comparons au score maximal que nous pouvons obtenir. Ces deux façons de faire engendrent l'envie. Et c'est précisément la présence potentielle de l'envie qui fait naître le dilemme. C'est pourquoi il est préférable de ne pas être trop envieux et prendre conscience que la maximisation de ses gains passe par celle des gains des autres. Seule la coopération est viable à long terme dans ce schéma.

[Edmonds & Moss, 2004] proposent une approche "anti-simpliste" de la modélisation. En effet, les critiques qu'ils portent sur les faiblesses de l'approche KISS reposent sur le fait que cette démarche oblige le modélisateur à faire des choix et à éliminer des éléments qui lui semblent sans importance, *a priori*. Le risque est alors de ne pas prendre en compte des informations qui pourraient s'avérer fondamentales pour décrire correctement la structure et la dynamique du système étudié. A l'opposé, l'approche KIDS qu'ils revendiquent, vise à incorporer dans un modèle toutes les informations disponibles sur le système étudié. Dans un deuxième temps et après analyse des résultats, le modélisateur peut éventuellement décider d'éliminer des informations qui s'avèrent superflues. Plutôt que de prendre le risque d'éliminer prématurément des éléments fondamentaux, l'approche KIDS opère donc en sens inverse, en intégrant d'abord tous les éléments de connaissance disponibles, puis après analyse, à rejeter certains qui s'avèrent négligeables. La figure suivante schématise les oppositions entre ces deux démarches.

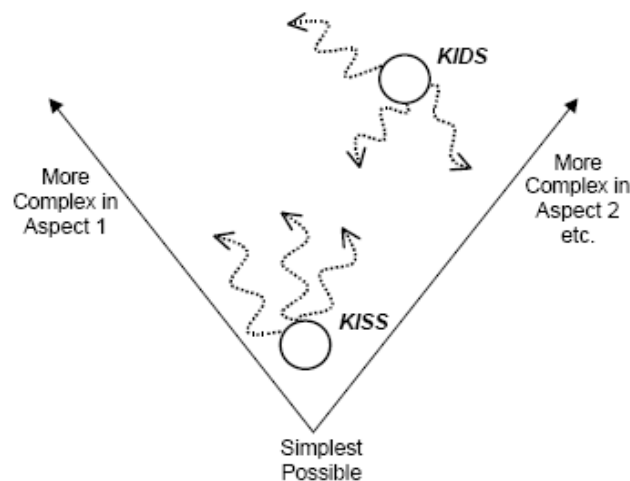


Figure 10-4 : Les deux approches de la modélisation : KISS qui part d'hypothèses minimalistes, quitte à complexifier le modèle dans un second temps, et KIDS qui intègre au préalable toutes les informations disponibles et élimine après coup certains éléments qui s'avèrent négligeables. D'après [Edmonds & Moss, 2004]

KIDS est donc basé sur l'idée que face à un phénomène mal compris, on ne peut pas faire de simplification *avant* de savoir ce qui s'avère effectivement important. En adoptant une démarche KIDS, les auteurs estiment que cette approche permet de tracer et de prouver ce qui semble moins important dans la représentation d'un phénomène. Contrairement à d'autres types de modèles, les auteurs considèrent que les SMA autorisent une correspondance plus directe entre ce qui est observé (description d'observations) et ce qui est modélisé.

10.2.3 KISS

Un des attrait des SMA que je considère plutôt comme une de leurs faiblesses, est la possibilité de complexifier sans fin un modèle pour tendre vers une représentation parfaite et réaliste du monde. En effet, si concevoir un modèle mathématique oblige à condenser les connaissances, la concision ne paraît pas être une contrainte lors de la conception d'un SMA. On peut y intégrer directement toutes les observations, à souhait.

10.2.3.1 Fausse naïveté du modèle neutre

En s'interrogeant sur les avantages de la modélisation individu-centrée et ce qu'elle a apporté à l'écologie, Volker Grimm [Grimm, 1999] suspecte une approche "naïve" de la modélisation qu'il désapprouve. Naïve dans le sens où elle consiste juste à représenter des données observées et leurs interrelations dans l'espoir incertain que l'auto-organisation dévoile les mystères du système étudié.

This naivety bears the risk that modelling is no longer regarded as a mental activity, but as something that is done by the model entities themselves: simply cram everything you know into a

model and the answers to the question at hand will emerge via self-organisation. But this never happens.[...] It seems as if many details are in the models simply because they make the model look more realistic. [ibid.]

Or, comme souligné au chapitre 2, les modèles sont des représentations dirigées par les objectifs ("purposeful representation" [Starfield et al., 1990]) pour capturer l'essence d'un phénomène. Une fois encore, il me paraît important d'affirmer qu'il n'y a pas de modèle neutre du monde. Tous participent de la formulation de points de vue, eux-mêmes façonnés par notre histoire, notre culture et nos présupposés.

Si les SMA permettent d'introduire toute la complexité désirée dans un modèle, le risque est grand de se protéger derrière l'outil en affirmant une neutralité objective. Pire encore, prétexter cette objectivité est la porte ouverte à toute manipulation.

10.2.3.2 Parcimonie

Le principe de parcimonie repose sur ce qui est souvent appelé "le rasoir d'Occam", d'après le philosophe médiéval anglais Guillaume Ockham (1285-1347). Il énonce que s'il y a plusieurs explications possibles, on préfère alors celle qui énonce le moins d'hypothèses.

Entia non sunt multiplicanda, praeter necessitatem. (Il ne faut pas multiplier les explications et les causes sans qu'on en ait une stricte nécessité), Guillaume d' Ockham

La modélisation multi-agent, comme toute modélisation d'ailleurs, doit obéir au principe de parcimonie. Non pas que la simplicité soit un gage de vérité mais parce que cette recherche de concision oblige à identifier et à comprendre les mécanismes fondamentaux à l'œuvre dans le phénomène étudié. "Il importe de dire le plus simplement du monde les choses les plus complexes".

10.2.4 Discussion

En intitulant leur article "Simple is beautiful... and necessary", [Deffuant et al., 2003a] répondent aux critiques qui visent un premier article plus ancien dans lequel était présenté un modèle décrivant la distribution et l'évolution des opinions d'une population d'agents et les processus de convergence [Deffuant et al., 2002]. Les remarques principales sur ce modèle portent essentiellement sur la trop grande simplicité de raisonnement des agents concernant leur prise d'opinion. Ces simplifications, voulues par les auteurs, aboutissent à des agents-particules doués d'aucune forme d'intelligence, ni de culture ni de mémoire, donc sans histoire.

Ainsi, à l'occasion d'un débat sur la simulation en sciences sociales [Von Randow, 2003], deux cultures se sont affrontées: l'une, défendue par les "socio-physiciens"¹¹² (en particulier Gérard Weisbuch), préfère aborder la modélisation en SHS (sciences humaines et sociales) à partir d'agents simples, comparables à des particules, et l'autre, davantage en accord avec la position des sociologues, recommande au contraire d'utiliser les agents cognitifs pour générer des dynamiques sociales. Si les premiers demandent pourquoi faire compliquer quand on peut faire simple, les seconds défendent l'idée que la réflexion humaine est bien plus complexe et que les hommes qui constituent une société ne peuvent pas être assimilés à des particules. Ils considèrent que la puissance des machines d'aujourd'hui permet de concevoir des modèles proches de la réalité.

¹¹² Pour ce néologisme, je me réfère à l'article du journal Le Monde intitulé "Les mathématiques s'invitent dans le débat européen", publié le 26 Février 2005 par Pierre Le Hir.

Dans le même ordre d'idées et en comparant la complexité du vivant à la simplicité des particules élémentaires qui constitue l'univers, Murray Gell-Mann (prix Nobel de physique en 1969 pour la théorie des quarks) cherche à savoir comment un simple assemblage de particules physiques peut donner un animal aussi complexe qu'un jaguar [Gell-Mann 1995].

Les auteurs [Deffuant et al., 2003] expliquent que les modèles compliqués ne sont pas nécessairement plus réalistes que les modèles simples. Ils ajoutent d'ailleurs que les architectures de type BDI très souvent utilisées pour modéliser des agents cognitifs ne s'appuient pas forcément sur des bases scientifiques robustes et qu'elles ne dérivent ni des préceptes des neurosciences, ni de la psychologie et ni de la philosophie. De même, les architectures à base de manipulation de symboles demeurent étrangères aux données de la linguistique. Ils concluent que concevoir des modèles compliqués est bien plus facile que d'établir des résultats robustes sur des propriétés émergentes.

D'autre part, j'ajouterai que l'intelligence, la psychologie, l'intuition, l'empathie mais aussi le contexte social et historique de tout être humain demeureront bien plus complexes et mystérieux que n'importe quelle théorie ou modèle aussi compliqués soient-ils. Courir après ce phantasme du modèle parfait me paraît voué à l'échec. Si les critiques vis-à-vis d'un modèle ne peuvent manquer (et elles sont nécessaires), l'insuffisance de sophistications ne devrait pas faire l'objet d'un tel reproche.

Dans le domaine des ressources renouvelables, il me semble nécessaire de travailler avec des sociologues car leur expérience et leur perception aiguisée du terrain révèlent souvent des points de vue insoupçonnés et des mises en perspectives qui donnent du sens. Mais si ma position rejoint plutôt celle de [Deffuant et al., 2003], c'est essentiellement sur le rôle des modèles et la façon de les concevoir. Car, comme on l'a vu au cours des chapitres précédents, même pour des modèles simplistes, les probabilités d'introduire involontairement des biais de simulation ne sont pas nulles. Etant donné la grande sensibilité des modèles multi-agents vis-à-vis de la gestion du temps et des interactions, mais également par rapport aux conditions initiales, voire même à la qualité du générateur de nombres pseudo-aléatoires, sans parler des erreurs liées au calcul par virgule flottante, les chances ne sont pas minces de conclure à des résultats qui s'avèrent être les conséquences d'artéfacts. Parce que le domaine semble encore trop jeune, le talon d'Achille des SMA reste la fiabilité des simulations et la grande difficulté à reproduire les résultats qu'ils exhibent. Ces deux faiblesses, trop fréquemment rencontrées, constituent des problèmes sérieux qui mettent en péril l'utilité des SMA.

Bien évidemment, des modèles trop simples des SHS ne peuvent être appliqués sans précaution à des situations politiques réelles. Mais de mon point de vue, cette remarque s'applique aussi bien, voire même davantage aux modèles plus compliqués pour lesquels ma réticence est encore plus prononcée.

En promouvant l'approche KIDS, Bruce Edmonds explique que l'analyse d'un modèle descriptif permet d'éliminer dans un deuxième temps des éléments finalement négligeables. Mais comme le remarque [Grimm, 1999], après tant de travail pour rendre un modèle réaliste, les concepteurs n'ont tout simplement pas le courage pour analyser leur modèle et définir des scénarios irréalistes qui permettraient d'en tester les limites. Peu nombreux sont ceux qui adoptent une attitude d'expérimentateur vis-à-vis de leur travail. D'ailleurs comme le soulignent [Deffuant et al., 2003], une étude approfondie d'un modèle compliqué et l'interprétation des résultats de milliers de simulations devient rapidement une tâche impossible. Ils préconisent alors d'avoir un minimum de connaissances sur les réactions d'un modèle plus simple autorisant des analyses poussées pour en tester la robustesse et comprendre tous ses comportements.

Pour illustrer leur propos sur les recommandations de l'approche KIDS, [Edmonds & Moss, 2004] présentent un modèle de gestion de bassin versant dont l'objectif est de comprendre les variations des demandes domestiques en eau [Downing et al., 2003]. Bien que très compliqué, ce modèle n'intègre pas toutes les données disponibles : les modélisateurs ont déjà filtré une grande part des informations disponibles, contrairement à ce qui est préconisé par Bruce Edmonds. Il me semble donc qu'il faille resituer leur article un peu provocateur dans le cadre de leur discipline – l'économie – où traditionnellement, les modèles dérivent de théories parfois très détachées du terrain. Face à cette tradition contraignante, les auteurs proposent une démarche plus ouverte mais

aussi plus directement comparable avec des descriptions d'observations (ce qui est trop rarement le cas des modèles standards).

Dans un autre registre (biologie et agronomie), Franck Varenne [2004] relate les oppositions entre le CIRAD et l'INRA au sujet d'une démarche de modélisation de la croissance des plantes : les chercheurs de l'INRA étaient partisans du développement de leurs modèles simples et compartimentés en recherchant des corrélations entre des données d'expérimentation et en ajustant les réponses. Les chercheurs du CIRAD de l'équipe AMAP étaient favorables à une modélisation plus ambitieuse et holistique prenant en compte la plante et son milieu en procédant par composition et multi-formalisme : à chaque échelle était associé un sous-modèle formalisé selon les besoins. Depuis, Amap a fait largement ses preuves et son succès croissant en fait une plateforme mondialement reconnue. F. Varenne associe ce succès à "l'approche de la modélisation de la structure avant toute modélisation de la fonction". Je pense que le cas d'Amap est particulier car il est lié à un domaine bien cerné qui a fait l'objet d'une longue histoire de la botanique. Le domaine était peut-être tout simplement "mur" pour tenter une démarche à la fois holistique et analytique. Mais dans l'état actuel des SMA, une démarche KIDS appliquée au domaine des ressources renouvelables me paraît périlleuse, à moins d'avoir une bonne vision de l'ensemble du sujet traité permettant une modélisation à la fois systémique et incrémentale, menée par des modélisateurs bien au courant de tous les biais de simulation susceptibles de survenir.

Pour revenir à l'article de Edmonds et Moss, le message le plus important porte finalement sur l'analyse d'un modèle plus ou moins compliqué pour en identifier les éléments qui ne s'avèrent pas essentiels dans la mesure où ils n'influencent pas la dynamique que l'on cherche à comprendre. Face à l'idée répandue que pour améliorer un modèle il faut y introduire de nouveaux composants¹¹³, l'élimination progressive des éléments considérés comme superflus après analyse, constitue une démarche originale qui procure une grande puissance au modèle. Plus difficile à mener que d'apporter des rajouts, ce travail de simplification permet de condenser le modèle. Il permet aussi de mieux cibler l'objectif : en identifiant des éléments qui s'avèrent négligeables vis-à-vis de la question de recherche, le modèle se renforce considérablement en prouvant l'insignifiance de phénomènes qui semblaient pourtant cruciaux.

Finalement, la critique principale que je reproche à leur article, porte plus sur le titre "*From KISS to KIDS; an 'anti-simplistic' modelling approach*", qui incite à une démarche holistique qui peut s'avérer fâcheuse à terme pour la modélisation multi-agent. Car le but principal de la modélisation n'est pas de mimer la réalité ni d'en simplifier la complexité, mais plutôt d'essayer de la comprendre :

However, what will continue to set IBE [Individual-Based Ecology] apart is its goal not to simplify ecological complexity but to understand complexity and how it emerges from the adaptive traits of individuals. [Grimm & Railsback, 2005]

10.2.5 Modèles géographiques : modèles-cathédrales ou modèles-Kleenex ?

Dans un autre domaine, des idées similaires sur la simplicité des modèles sont également portées par une partie des géographes. Dans [Thery, 2002] par exemple, Hervé Thery constate que nous possédons maintenant des outils techniques sophistiqués (ordinateurs, bases de données, images satellites, etc.) permettant de construire des cartes de haute résolution. Mais au-delà de ces outils précieux, le travail du géographe consiste à ses yeux en l'élaboration de modèles simples à fortes

¹¹³ En effet, il est fréquent de lire que pour enrichir un modèle, de nouveaux éléments de connaissance doivent s'y intégrer. D'un niveau d'élaboration simple, le modèle passe progressivement à un niveau de complexité élevée par ajout de nouveaux éléments. Lorsque cet enrichissement se stabilise, le modèle a alors atteint un niveau qui correspond à ce que J. Erceau [1995] appelle le "degré de complexité requis" reprenant par-là l'idée du "degré de variété requis" de R. Ashby [1956]. Ainsi, selon ce principe, la compréhension d'un système exigerait que lui soit opposé un modèle cognitif ayant un degré de complexité équivalent [Bradbury, 2002].

portées explicatives, c'est-à-dire des modèles "qui parlent". L'art du géographe réside dans la qualité des simplifications qu'il opère, en fonction de l'objectif qu'il se donne. Dans la lignée des travaux de Roger Brunet [Brunet, 1990] sur "Le déchiffrement du Monde", il considère que la modélisation en géographie a pour but "d'être utile aux autres" en dévoilant un autre regard, un nouveau point de vue. Bien que notre monde soit chaque jour dominé par les images, les géographes doivent néanmoins "oser utiliser les images" et "oser être simple" :

Nosso dever de cientista e de professor é descobrir o simples atrás do complexo. Nosso trabalho passa por uma etapa de redução, devemos reduzir a complexidade a uma combinação de estruturas simples: não se trata de dizer que o complicado é simples, mas de ver como uma combinação de estruturas simples pode levar a algo complexo¹¹⁴. [Thery 2002]

Pour illustrer son propos, l'auteur présente un "modèle au carré" du Chili [Sepúlveda et al., 2002] car ce pays constitue un bon exemple de territoire dont la forme, très originale, masque la structure. "Modéliser le Chili en commençant par le ramener à un carré, mettant ainsi de côté le caractère particulier de la forme, permet de faire ressortir d'autres structures spatiales. Loin de conduire à une caricature, l'opération permet au contraire d'enrichir l'interprétation de l'espace chilien, dont certains des traits dépendent à l'évidence du modèle économique." [ibid.]

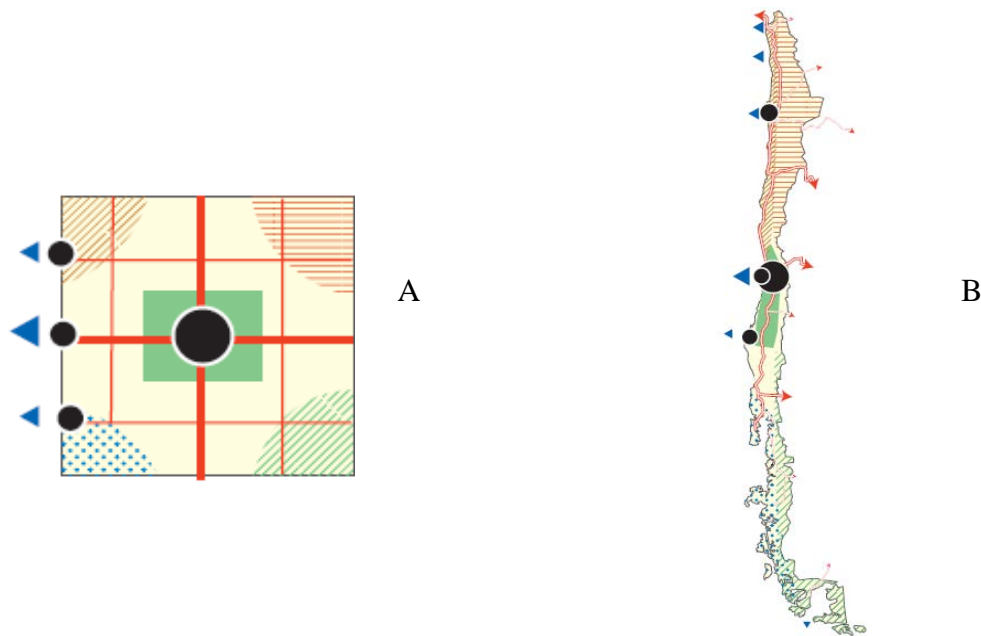


Figure 10-5: Le Chili... enfin plutôt un "modèle au carré" du Chili (A) et sa transposition sur un fond de carte (B). Le choix d'une figure carrée aide à percevoir plus facilement les spécificités régionales liées à la fois aux situations, aux circulations et aux positions urbaines que masque d'habitude la forme du pays.

L'effort d'abstraction a permis de construire un modèle carré qui fait ressortir les structures et met en lumière des éléments d'organisation et de fonctionnement de l'espace chilien qui sinon resteraient peu apparents. Seule la rupture qu'introduit le carré permet la comparaison avec d'autres espaces, dont la forme externe peut être très différente de celle du Chili. La confrontation avec la carte (figure B) permet de tester le modèle et redonne toute son importance au facteur distance.

Cette branche de la géographie s'appuie sur les travaux de Roger Brunet [Brunet 1990] qui cherche à *déchiffrer* la complexité des formes spatiales. Il remarque qu'en comparant différents territoires, on décèle de nombreuses régularités et des formes communes à toutes les échelles. Ces formes

¹¹⁴ "Notre devoir de scientifique et d'enseignant est de découvrir le simple derrière le complexe. Notre travail passe par une étape de réduction; nous devons réduire la complexité en une combinaison de structures simples : ceci ne signifie pas que le compliqué est simple, mais implique plutôt de voir comment une combinaison de structures simples peut produire de la complexité."

résultent de l'action humaine s'exerçant sur les milieux. Il postule alors l'existence d'un ordre sous la complexité apparente des configurations géographiques; un ordre qu'on ne peut comprendre qu'en comparant les lieux entre eux. Et pour cela, il est nécessaire de créer des modèles géographiques. C'est à partir de ce constat que l'auteur a inventé les *chorèmes* : des structures élémentaires de l'espace. Sur une base de 28 chorèmes, dont chacun représente une configuration spatiale, le géographe construit en les rassemblant un modèle chorématique représentant des phénomènes spatiaux à différentes échelles. Le modèle produit permet alors de mieux appréhender la complexité du territoire et de comprendre les formes spatiales, leur origine, leur histoire et peut-être leur devenir. Brunet explique que ces modèles constituent des clés pour la compréhension du territoire et de son organisation et permettent de déchiffrer les logiques évolutives, mais ils ne peuvent en aucun cas servir pour prédire leur devenir : le modèle est une représentation abstraite et provisoire d'une réalité beaucoup plus complexe.

Les modèles chorématiques sont des constructions de l'esprit dont la simplicité apparente n'est pas donnée en soi, mais elle est le résultat d'un difficile travail de conception qui nécessite d'interpréter les données et de faire des choix. Le modèle permet de présenter le résultat de ce travail.

Malgré l'abondance d'outils techniques à disposition, de nombreux géographes préconisent l'usage de modèles simples qui permettent de comprendre une configuration donnée, de l'expliquer et de la partager avec les autres. A l'opposé des modèles-cathédrales, H. Thery préconise l'utilisation de "modèles-Kleenex". Dans le domaine de la modélisation multi-agent, il me semble que ces principes soient tout autant valables.

10.3 DU MODELE DESCRIPTIF AU MODELE ADAPTATIF EN CIBLANT LA QUESTION DE RECHERCHE

Pour finir sur cette question opposant réalisme et simplification, je souhaite retranscrire le cheminement du modèle *TransAmazon*. Ce modèle, encore en cours de développement, est présenté au dernier chapitre et sert d'exemple pour illustrer plusieurs aspects de la thèse. Contre à toute attente, nous n'aspérons pas à plus de sophistications, mais nos efforts tendent plutôt à en réduire la complexité. Voici en quelques lignes, l'historique de son développement :

Version 1- Le travail a consisté en un premier temps à réunir et à condenser les connaissances accumulées sur le terrain. Un premier modèle conceptuel a alors été élaboré. La question que l'on souhaitait traiter était de comprendre les pratiques des producteurs en Amazonie et leurs impacts sur la forêt. Le modèle consistait alors à décrire les activités saisonnières des petits colons.

Version 2- Bien que la littérature propose 6 types d'acteurs, nous nous sommes aperçus de la répétition de certains comportements. Après examen, deux stratégies ont finalement été retenue : Planteur et Eleveur. Du fait que les agents peuvent changer de stratégie au cours du temps, les simulations ont permis de retrouver les typologies décrites initialement. Cette généralisation a constitué une première réduction d'un modèle très *descriptif* en un modèle plus *explicatif*. Les changements de stratégies sont alors devenus un point sensible du comportement des agents.

Version 3- Pour utiliser cet outil et le comparer à d'autres modèles traitant des dynamiques des fronts pionniers, nous avons voulu tester ses réponses face à certaines politiques publiques telles que la rémunération pour service environnemental : offrir une rente pour chaque hectare de forêt laissée sur pied devait inciter les producteurs à conserver leur réserve forestière. La question des économistes est alors de savoir à quel prix minimum faut-il indemniser le producteur ? Or pour tester cette hypothétique politique, il nous a fallu modifier le modèle : au côté de Planteur et Eleveur, une 3^{ème} stratégie alternative "Conservationniste" a été rajoutée. Au contraire des deux autres, le Conservationniste ne fait qu'entretenir les cultures déjà installées sans brûler de nouvelles parcelles. Cet ajout était nécessaire car les deux précédentes ne permettaient pas d'évaluer l'impact d'une politique d'incitation : chacune applique le déroulement de ses activités sur l'espace sans

possibilité de changement radical. Le modèle était moins câblé que dans sa première version-1 à 6 stratégies mais restait néanmoins figé sur deux alternatives de gestion de la terre. En quelque sorte les agents pouvaient changer de stratégie mais ne pouvaient pas s'adapter efficacement à des changements de leur environnement (politique). Même si un gros effort de réduction avait été fait, le modèle restait encore trop rigide, et peut-être même un peu ad hoc.

La version 4 cherche à redonner plus de souplesse dans les possibilités d'adaptation des agents. Les stratégies qui étaient des déroulements un peu mécaniques des activités des agents, ont été supprimées. L'agent connaît maintenant un certain nombre d'activités élémentaires qu'il peut effectuer sur sa terre. Pour déterminer dynamiquement sa stratégie, il anticipe ses futurs possibles en testant de façon imaginaire des combinaisons d'activités. En d'autres termes, il explore un certain nombre de trajectoires et choisit celle qui lui paraît la plus rentable ou la moins risquée. Ainsi, en fonction de changements environnementaux (au sens large), il est capable de choisir des activités agricoles qui limitent ses risques. Avec cette nouvelle version, nous sommes passés d'un modèle encore trop descriptif à un modèle moins "câblé". De façon conjointe, la question de recherche a évolué : la gestion du risque et de la sécurité alimentaire s'avère décisive pour la conduite des activités des colons.

En conséquence, *TransAmazon* passe progressivement de l'état de modèle descriptif permettant de faire des simulations-films à un modèle plus général susceptible de tester des scénarios alternatifs. En quelques sortes, il a amélioré sa valeur informative. La figure suivante, inspirée à partir de la première figure 2-6 (p. 52) résume cette nouvelle vision du processus de modélisation :

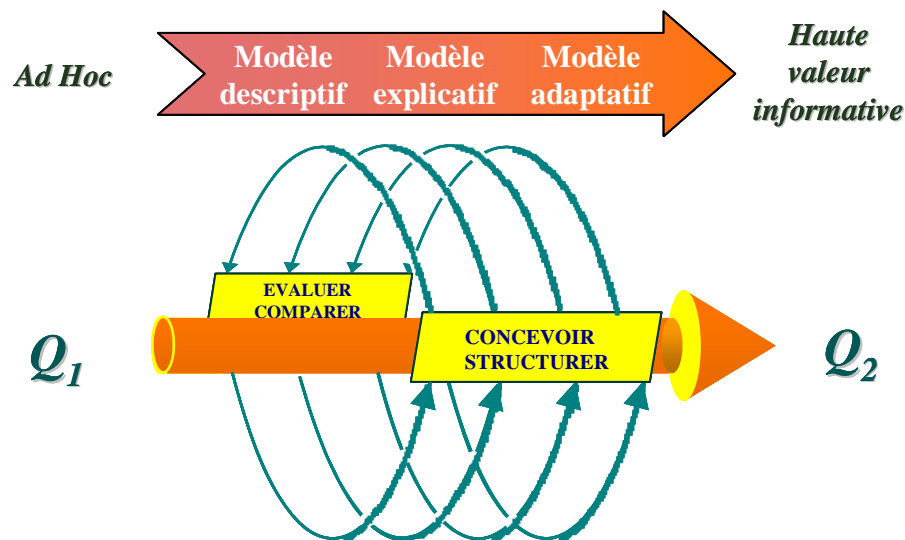


Figure 10-6 : Evolution d'un modèle avec le déplacement de la question de recherche

Au cours du processus de modélisation, le modèle change progressivement d'état : il passe d'un état uniquement descriptif à un état plus explicatif jusqu'à un état adaptatif. En améliorant sa genericité, il a renforcé sa valeur informative. Simultanément, la question de recherche s'est déplacée afin de mieux cibler les problèmes sensibles qui affectent le système étudié.

On se trouve ainsi dans une sorte de contradiction qui consiste à reconnaître la nécessité de préciser l'objectif et la question avant de construire le modèle et à admettre dans le même temps que la modélisation conduit à faire évoluer cette question. Mais ce processus semble s'appliquer à plusieurs projets de modélisation auxquels j'ai participé.

10.4 CONCLUSION GENERALE

Gérer les ressources renouvelables oblige à prendre en compte les dimensions à la fois écologiques, économiques et sociales des systèmes. Si en outre, on s'interroge sur la durabilité de ces socio-éco-systèmes et sur leur évolution à moyen ou long terme, les réponses sont rarement simples, d'autant plus qu'il est nécessaire de comprendre les intérêts et les stratégies des acteurs. Pour imaginer les futures possibles de ces systèmes ouverts et interconnectés, il s'avère que la modélisation multi-agent peut jouer un rôle non-négligeable.

Mais pour cela, il est nécessaire de rester prudent sur la conception et l'utilisation de ces outils. Car les SMA souffrent encore de fragilités liées certainement à leur jeunesse. Comparés aux modèles mathématiques qui s'appuient sur une longue tradition scientifique, les SMA ne permettent pas, entre autre, de démontrer les caractéristiques d'un modèle. En outre, on peut légitimement s'interroger sur la fiabilité des résultats dès lors que de nombreux biais peuvent survenir. Parmi ceux-ci, il s'avère que la manière dont sont gérés le temps et les interactions entre agents, peut influencer fortement le déroulement des simulations. Or ces aspects sont généralement sous-estimés : on préfère souvent améliorer la prise de décision d'un agent ou le réalisme de son comportement ou encore la qualité du générateur de nombres pseudo-aléatoires, au détriment d'une gestion claire et sans biais de l'activation des agents ou des interactions. Mais les exemples présentés ici, ainsi que les divergences constatées lors des rares expériences de réplcation, montrent que ces problèmes de gestion ne sont pas suffisamment examinés.

Malheureusement, il n'y a pas de solution générale pour choisir une gestion du temps plutôt qu'une autre. Certains préféreront des traitements événementiels qui sont nécessaires pour aborder des problèmes continus tels que les mouvements et les collisions. Mais la gestion des ressources ne nécessite pas forcément de descendre à ce niveau de raffinement. De plus, une telle démarche ne paraît pas indispensable dans la mesure où les systèmes étudiés révèlent souvent des phénomènes discrets. Certes, des dispositifs informatiques existent pour aider cette gestion, mais ils n'épargnent pas un travail de conception approfondie sur ces sujets. Car la façon dont est conduite une interaction ou une gestion du temps doit être comprise comme faisant partie intégrante du modèle et non pas comme un accessoire lié à la machinerie. Pour gérer ce type de problème, il n'y a pas de solution neutre qui conviendrait en toute situation. Le modélisateur doit les prendre en charge pleinement et expliciter ses choix.

La phase d'exploration des modèles ne doit pas être négligée dans un processus de modélisation. Au contraire, elle constitue une étape indispensable qui procure son lot de surprises. En améliorant la compréhension du modèle, elle permet d'en déceler les dysfonctionnements, mais aussi de hiérarchiser l'influence de ses paramètres et de tester la robustesse des concepts véhiculés. Car la valeur d'un modèle dépend davantage de cette robustesse que de la précision de ses paramètres. Evidemment, plus le modèle est compliqué et plus l'exploration s'avère fastidieuse et longue, mais elle est d'autant plus indispensable. Tester et prouver la robustesse d'un modèle permet aussi de montrer qu'un SMA n'est pas forcément un objet complexe et hyper sensible dont les résultats ne dépendent que de la valeur de ses paramètres et des conditions initiales.

Pour contrer le courant de défiance vis-à-vis des SMA et pour arrêter de les considérer comme des boîtes noires aux résultats suspects, il est essentiel de prouver la robustesse des modèles mais aussi de mieux les décrire. Pour cela, il faut utiliser des protocoles de description du type ODD, mais aussi considérer UML comme un outil de dialogue entre disciplines. Pour faciliter la communication et "penser par diagramme", il est nécessaire de retravailler les schémas issus des phases de conception pour les épurer davantage en mettant en lumière les principaux éléments du modèle. Les diagrammes finalisés peuvent alors être bien différents de ceux qui ont servi à la conception du modèle et à l'implémentation du simulateur. Mais ils offrent l'avantage d'être porteurs de sens et de permettre la critique. Car de bons diagrammes doivent aussi être

compréhensibles par tous et être réfutables. De plus, s'ils permettent de répliquer les résultats du simulateur, alors on aura contribué à consolider le domaine des SMA.

Au delà des problèmes de fiabilité, il existe d'autres écueils. Dans l'état actuel du domaine, une complexification sans limite des modèles s'avère problématique : les sources d'erreurs et d'artéfacts sont multipliées et les concepts véhiculés sont noyés dans les détails. En cherchant à représenter la réalité, le concepteur se perd dans le monde virtuel qu'il crée. Or le but principal de la modélisation n'est pas de mimer le réel, mais plutôt d'essayer d'expliquer des phénomènes pour suggérer des solutions. D'ailleurs, un modèle n'est pas neutre car il présente un point de vue sur le monde, lourd de présupposés. En admettant ce postulat, on conçoit que la modélisation qui s'apparente à un processus d'apprentissage par essais-erreurs et révisions, a pour rôle de tester des explications possibles mais aussi de proposer et d'affiner des questions.

Face à la complexité d'un socio-éco-système, il n'est pas nécessaire de concevoir un modèle présentant un même degré de complexité. Au contraire, il est plus important de découvrir les principes qui en dirigent l'évolution. On peut alors présenter un modèle dont la structure paraît simple de prime abord. Mais les simulations qui animent les agents, les mettent en mouvement et les font interagir, permettent de révéler la complexité de mécanismes interdépendants. Cette complexité retrouvée reste une expérience incompressible qui ne peut se démontrer. Néanmoins l'analyse de son déroulement permet d'en comprendre les raisons et d'en tirer les principes majeurs.

Dans cette perspective, la "validation" qui laisse sous-entendre la certitude, demeure problématique. Car sous prétexte de déclarer un modèle comme "valide", on pourrait s'autoriser à prendre toutes sortes de décisions en se fiant à ses seuls résultats. Ainsi, quel que soit le type d'outil utilisé, il est nécessaire de rester dubitatif sur le terme "validation" dès qu'il s'agit de représenter des socio-éco-systèmes. La comparaison des sorties d'un modèle avec des données ne suffit pas pour en évaluer la pertinence. Il faut également inspecter les mécanismes pour vérifier l'absence de divergence entre les spécifications du modèle et le déroulement des simulations. Mais même si la fiabilité du simulateur est certifiée, la comparaison avérée des sorties avec des données empiriques n'est pas un gage de qualité.

A l'opposé du modèle "ad hoc" dans lequel les comportements des agents sont calqués de façon figée sur des séquences observées, le « degré de falsifiabilité » d'un modèle apparaît être un critère important pour juger de sa valeur. Ainsi plus un modèle « énonce d'assertions sur le monde », plus il est falsifiable et plus sa valeur informative devient importante. Contrairement à la simple description d'une suite de données, un modèle falsifiable doit étendre son domaine d'application. Dans cet esprit, on admet qu'un bon modèle est audacieux. On en déduit que les agents d'un SMA doivent être les plus autonomes possibles pour répondre de façon appropriée et flexible à des modifications de leur environnement (au sens large). Toutefois, il ne s'agit pas d'appliquer systématiquement le principe "Influences-réaction" pour rendre compte de cette autonomie. D'ailleurs en cherchant à garantir l'intégrité informatique des agents, cette manière d'aborder les SMA n'épargne pas une gestion des interactions. Il s'agit plutôt d'émuler cette autonomie.

Le modélisateur doit expliciter les questions qu'il se pose au sujet de son objet d'étude. En effet, préciser l'objectif du modèle est indispensable car cela restreint le mode de modélisation à conduire et fournit un cadre pour toute la description de celui-ci. Toutefois il faut le reconnaître, expliciter ses questions de recherche n'est pas un exercice trivial. C'est peut-être une des difficultés majeures du processus de modélisation. Mais c'est un exercice obligatoire et dans la pratique, on s'aperçoit que cette fameuse question évolue au cours du processus et devient souvent plus pertinente au fur et à mesure du travail. Dans le même temps, le modèle évolue également d'un stade souvent descriptif vers un stade plus générique. Ceci ne signifie pas une sophistication pour tendre vers plus de réalisme. Au contraire, ce processus peut conduire à un modèle plus concentré sur les éléments essentiels du système étudié. Le simulateur peut alors servir pour retracer des évolutions rétrospectives ou anticiper des scénarios prospectifs. On teste alors ses capacités

d'adaptation. S'il parvient à mimer les grandes tendances ou s'il permet de reproduire les changements de phase, alors notre confiance en ces résultats est renforcée.

Finalement, l'intérêt essentiel de la modélisation n'est pas le modèle en lui-même ni son simulateur, mais ce que le processus a occasionné : il a transformé notre manière de voir le système étudié. En poussant ce raisonnement, on pourrait même admettre avec [Grimm, 1999], qu'un critère pour reconnaître la valeur d'un modèle est qu'il ne soit plus nécessaire après coup. Le processus de modélisation a abouti lorsqu'il a changé notre représentation du monde en proposant une explication plus pertinente. Sans plus se référer au modèle ni aux résultats des simulations, nous devrions être en mesure d'expliquer les mécanismes fondamentaux qui dirigent les dynamiques. Le modèle a atteint son objectif : il nous a aidés à comprendre et à démontrer comment fonctionnent le système étudié.

Chapitre 11

APPLICATION DE LA METHODOLOGIE : EXEMPLE DU MODELE TRANSAMAZON

Ce chapitre présente de façon plus concrète les concepts présentés dans la thèse. Le modèle *TransAmazon* qui cherche à représenter les dynamiques d'utilisation du sol en Amazonie et la manière dont les producteurs prennent leurs décisions, est décrit ici pour illustrer certains aspects du cadre méthodologique dessiné dans cette thèse. Néanmoins, ce modèle ne doit pas être pris comme une référence en soi (un modèle du genre !) et d'ailleurs son développement n'est pas achevé. Plusieurs versions sont présentées qui révèlent l'évolution du processus et l'ajustement de la conception avec les modifications des objectifs du modèle. Ce travail aurait en lui-même pu faire l'objet d'une thèse tellement les recherches sur l'Amazonie sont nombreuses. En effet, le contexte amazonien n'est pas simple. Il est le fruit d'une histoire mouvementée, souvent douloureuse, sous l'emprise de politiques volontaristes de colonisation.

Pour faciliter la lecture, les références aux parties développées dans la thèse sont placées entre accolades et soulignées par des liens hypertextes.

11.1 LE CONTEXTE AMAZONIEN

"Donner à une terre sans homme, des hommes sans terre"
"coloniser pour ne pas abandonner"
"coloniser par la patte du bœuf"

*Slogans gouvernementaux des années 60-70
pour la colonisation de l'Amazonie*

En 1988, suite à l'assassinat de Chico Mendes, leader seringueiro¹¹⁵, l'Amazonie est devenue le symbole mondial de la lutte pour la préservation de l'environnement. Car, selon l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), l'Amazonie brésilienne (6,7 millions de kilomètres carrés, 7 fois la superficie de la France) perd pratiquement 24.000 km² de forêt tropicale chaque année et 15% du massif a été détruit ces dernières décennies. Parmi les raisons de cette déforestation, on pense souvent de l'autre côté de l'Atlantique qu'elle est liée aux "madeiros" qui en exploitent le bois de façon non certifiée. Certes, la production non gérée de bois est effectivement une cause de déforestation, mais elle n'en est pas la principale. L'élevage est un facteur bien plus important. Car avec l'augmentation des exportations de viande bovine vers les marchés européens notamment, le nombre de têtes de bétail en Amazonie brésilienne a doublé au cours des dix dernières années. Or ce bétail a besoin d'espace et la plus grande forêt tropicale du monde cède progressivement du terrain en faveur de nouveaux pâturages [Tourrand et al., 1999 et 2002], [Ferreira, 2001]. Aujourd'hui le Brésil possède le plus grand cheptel du monde et il est devenu en quelques années

¹¹⁵ Les seringueiros sont les travailleurs qui extraient la sève des hévéas pour produire du caoutchouc. Lors de nombreux combats syndicaux pour la défense de la forêt amazonienne, Chico Mendes a préconisé que soient créés des réserves forestières, gérées par les communautés traditionnelles pour favoriser une production durable. Il est devenu le porte parole des défenseurs de la forêt, des seringueiros et des Amérindiens, face au lobby des propriétaires terriens et des grands fazendeiros. Il est mort assassiné par l'un d'eux le 22 décembre 1988 à Xapuri.

le leader des exportations mondiales de viande de bœuf. L'Amazonie y joue un rôle majeur¹¹⁶, ce qui fait dire à [Kaimowitz et al., 2004] que cette région a rejoint la "Hamburger Connection"¹¹⁷.

A partir des années 50, une politique volontariste a été engagée pour occuper l'espace amazonien. Cette volonté était commandée par trois objectifs. Le premier consistait à sécuriser les frontières disputées par les pays voisins mais aussi à affirmer la souveraineté du Brésil sur ce massif forestier considéré par certains environnementalistes comme un bien mondial de l'humanité. La seconde motivation était de tirer profit de cette réserve en ressources minières et de développer l'extractivisme. Le troisième objectif était de profiter de cette espace pour éviter une réforme agraire au Nordeste et au Sud du pays. Ainsi, sous l'impulsion de décisions politiques diverses (de Kubitschek à Lula, en passant par la dictature militaire 1964-1985), cet espace a été volontairement colonisé grâce à la construction d'un réseau routier et de diverses incitations foncières et financières pour y attirer des investisseurs et des milliers de colons¹¹⁸. L'installation de ces petits fermiers le long des axes de pénétration a entraîné l'avancée de la frontière agricole, appelée front pionnier. Considéré comme le principal facteur de déforestation, l'élevage extensif est responsable de plus de 50% de la déforestation et l'agriculture itinérante sur brûlis représente 30 à 35% des surfaces déforestées [Bonaudo, 2005].

Ces familles paysannes, issues des migrations en provenance du Sud, du Sud-est et du Nordeste du Brésil, ont eu accès à la terre soit en bénéficiant d'un lot attribué par l'état, soit en achetant un terrain. Auparavant ces familles étaient souvent employées dans des exploitations sans jamais avoir possédé de terre avant de migrer en Amazonie :

"J'ai aimé être ici car c'est ici qu'on a trouvé une petite terre. Là-bas on habitait sur la terre des autres, allant par ici en allant par-là". Dona Maria, citée par [Negreiros Alves, 2004]

Car les problèmes environnementaux ne doivent pas cacher les difficultés sociales et individuelles de ces petits paysans soumis à la dureté du climat, à l'isolation, aux aléas du marché et aux maladies, sans parler des relations avec les fazendeiros ou celles avec les scieries clandestines.

"L'émergence de nombreux conflits entre les grands exploitants agricoles et les sans-terres, les titulaires de titre de propriété et les indiens, les indiens et les chercheurs d'or ou les grandes entreprises qui se disputent un même espace ou une même richesse minière. L'Amazonie est devenue la scène d'une véritable foire d'empoigne où les conflits se règlent par des assassinats ou des exécutions sommaires." [Negreiros Alves, 2004]

De plus, les systèmes de production mis en place ne sont pas toujours compétitifs et font face à des contraintes écologiques de plus en plus fortes (érosion des sols, changement climatique¹¹⁹, perte de

¹¹⁶ Aujourd'hui, l'Amazonie compte plus de 57 millions de bovins (1/3 du cheptel brésilien). De plus, avec un taux de croissance annuelle de plus de 10,5%, depuis 1990, l'Amazonie est en passe de devenir le premier bassin d'élevage du monde [Tourrand et al., 1999].

¹¹⁷ Norman Myers a utilisé l'expression "Hamburger Connection" pour décrire un phénomène similaire en Amérique centrale dans les années 80. A cette époque, les exportations de viande de cette région alimentaient les chaînes de fast-food aux Etats-Unis et contribuaient au processus de déforestation.

¹¹⁸ L'INCRA (Institut National de Colonisation et de Réforme Agraire), créé en 1970, était en charge de la réforme agraire et de la promotion de la colonisation. L'INCRA avait pour mission de construire les routes, d'établir le cadastre, de distribuer les terres et d'assurer l'assistance technique aux producteurs.

¹¹⁹ L'Amazonie est une des régions la plus humide au monde. Or l'humidité des régions tropicales constitue la première source de redistribution de chaleur pour la Terre. En effet, lorsqu'il pleut, l'eau passe de l'état gazeux à l'état liquide pour s'évaporer de nouveau. Ces processus accumulent ou libèrent de la chaleur. Aussi, une grande partie de l'humidité de l'atmosphère de l'Amazonie provient de la vapeur d'eau recyclée par évapotranspiration par la forêt elle-même. Or, si le déboisement ne semble pas modifier le cumul moyen des pluies, il changerait significativement la distribution et le cycle des précipitations par son influence sur la quantité de chaleur dégagée. Par ailleurs, [Andreae et al., 2004] montrent que la pollution causée par les brûlis de bois diminuerait la quantité de pluie mais aussi la couverture nuageuse. Ces phénomènes pourraient également avoir une incidence sur le climat continental [Malhi et al., 2008].

biodiversité, etc.). Enfin, sur de nombreux fronts pionniers, on assiste à une concentration foncière qui écarte une partie de la population des bénéfices liés à l'usage de la forêt. Malgré de nombreuses ressources, on constate une augmentation de la pauvreté, de la précarité de toute une frange de la population et des dégradations environnementales irréversibles [Nepstad et al., 2002].

Aujourd'hui, sous les pressions nationales et internationales, le développement de la région se voudrait durable, écologiquement, économiquement et socialement. Mais, avec une très faible valorisation de la forêt sur pied, l'agriculture extensive reste la principale source de revenu et le rythme de déforestation ne ralentit pas. D'ailleurs la forêt est toujours considérée comme une simple *réserve*¹²⁰ d'espace à transformer pour favoriser le développement économique [Poccard-Chapuis, 2004].

Pourtant, les grandes directives politiques pour coloniser l'Amazonie se sont progressivement estompées au profit de réglementations pour la préservation de l'environnement. Mais ce changement de politique laisse les colons dans une position inconfortable :

*“Quando chegaram os cientistas disseram que devíamos desmatar perto do igarapé para eliminar a malária e a febre amarela, mas não tinha nem malária nem febre nessa região. E agora nos chamam de bandidos da Amazônia”*¹²¹. Senhor Cirilo, petit exploitant de cacao interviewé à Uruará.

Beaucoup de ces colons se sentent accusés par l'opinion internationale qui les considère comme les responsables des dommages écologiques. Ils sont souvent irrités par les critiques à leur égard et réagissent parfois violemment aux interventions de l'Ibama¹²². A tel point qu'il est mal vu voire dangereux de s'afficher comme environnementaliste en Amazonie, surtout si l'on est étranger !

Aujourd'hui, suite à la suspension des programmes de colonisation, des courants politiques s'affrontent au sein même du gouvernement fédéral. Les uns approuvent des actions incitatives pour continuer le développement économique (programme *Avança Brasil*) quand d'autres soutiennent des réglementations pour la protection de l'environnement. Mais proposer des lois exclusivement environnementales en ignorant les conditions de vie des petits producteurs entraînera certainement l'exclusion d'une partie de la population qui ira alimenter les favelas et conduira à un durcissement des conflits sociaux sans résoudre les problèmes de déforestation. Au contraire, réfléchir sur l'amélioration des conditions de vie, sur l'éducation, sur des technologies agricoles plus adaptées au milieu et sur la mise en place de marchés de produits forestiers non ligneux ou de bois certifiés, apparaît être une solution plus adaptée pour favoriser de nouveaux modes de gestion des ressources naturelles. Il est donc nécessaire et urgent de trouver des alternatives qui concilieraient la conservation et les besoins des populations locales.

11.2 LOCALISATION DU SITE D'ETUDE

A travers le modèle *TransAmazon* publié dans [Bonaudo et al., 2005], nous nous intéressons à la gestion environnementale d'un front pionnier situé dans la commune d'Uruará (état du Pará) sur la Transamazonienne (BR 364). La superficie de la commune est de 10.796 km². Le climat y est équatorial avec une saison des pluies qui s'étend de décembre à mai.

¹²⁰ La partie de forêt naturelle présente sur une exploitation est d'ailleurs appelée « *reserva* » par les producteurs. Ils considèrent par là que cette partie de forêt n'est qu'une réserve de fertilité sur pied dont la finalité est à terme d'être coupée et brûlée pour laisser place à une parcelle agricole fertile [Veiga et al., 2004].

¹²¹ "Quand ils sont arrivés, les scientifiques ont dit que nous devons déboiser près de la rivière pour éliminer la malaria et la fièvre jaune, mais il n'y avait ni la malaria ni la fièvre dans la région. Et maintenant ils nous appellent les hors-la-loi de l'Amazonie".

¹²² Ibama : Institut Brésilien de l'environnement et des ressources naturelles renouvelables (fondé en 1989)

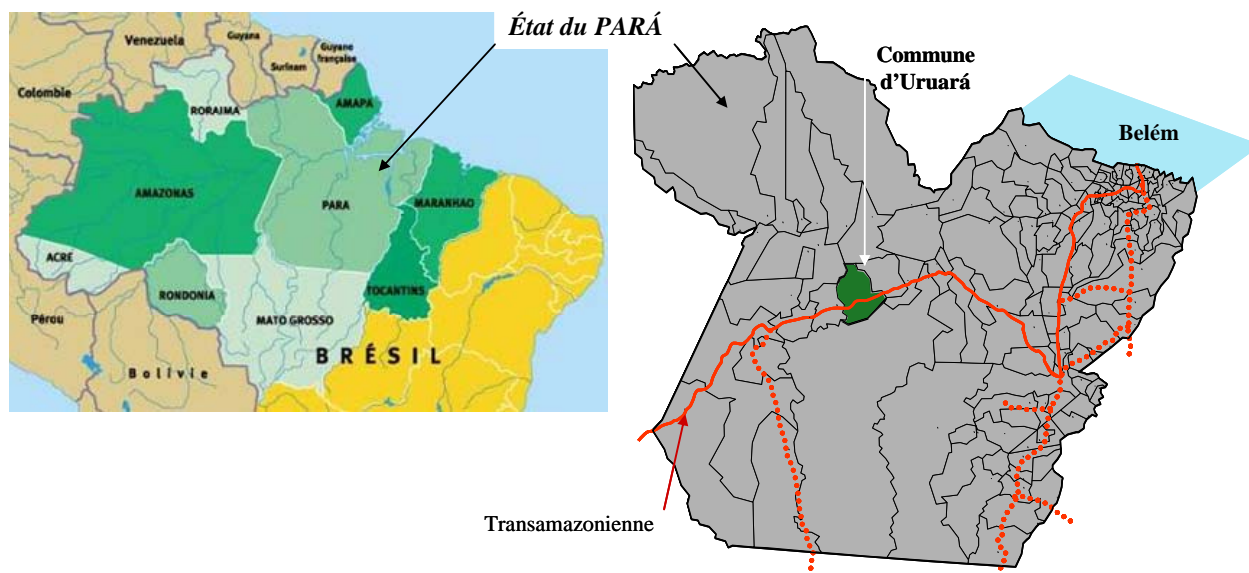


Figure 11-1: Localisation de la commune d'Uruará. A gauche, les neuf états qui couvrent les 5,5 millions de km² de l'Amazonie brésilienne ; à droite, l'état du Para (capital Belém) et Uruará traversée par la Transamazonienne

Uruará est une commune récente (1972) qui n'était pas initialement prévue par le plan d'aménagement de l'INCRA, contrairement à Novo Brasil et Medicilândia. Or ces deux communautés sont plus proches de la grande ville, Altamira et se sont moins bien développées. La situation d'Uruará à 200 km d'Altamira explique certainement les raisons de son émergence, car cette distance à la ville limite les échanges (en saison des pluies, il n'est pas rare de mettre 1 à 2 jours pour y arriver, ce qui est très pénible, même pour y mener des recherches !).



Figure 11-2: Etat de la Transamazonienne en saison des pluies.

Avant la colonisation, la commune était couverte de forêt occupée par les indiens *Araras*. Aujourd'hui, ils vivent dans deux réserves situées au sud de la commune.

11.3 OBJECTIFS DU MODELE

Ce rapide panorama de la situation ne sert qu'à introduire le contexte dans lequel ce travail de modélisation s'inscrit. Il est évidemment trop limité et la lecture des ouvrages cités ci-dessus permettra de mieux comprendre la situation générale de ces fronts pionniers.

11.3.1 La question de recherche, point d'entrée de la modélisation {[chap. 2](#)}

Le premier objectif du modèle est de formaliser et de synthétiser 15 ans de connaissances sur les dynamiques pionnières à Uruará. En effet, un matériel très conséquent est disponible sur ce municpe tel que des SIG, des cartes de télédétection, de nombreuses monographies, thèses, base

de données, etc. Ce travail de modélisation vise donc à obtenir une vision plus synthétique des dynamiques rurales.

De plus, la modélisation a également pour objectif de mieux comprendre les activités humaines pour les intégrer dans les dynamiques conduisant à la déforestation. Grâce à la représentation des processus spatiaux et sociaux, le modèle cherche alors à retracer les dynamiques passées et à anticiper les évolutions possibles des fronts pionniers. Mais, contrairement à la plupart des modèles sur l'Amazonie qui abordent le problème de la déforestation au niveau du bassin amazonien, le modèle *TransAmazon* se focalise sur les petits exploitants, principaux acteurs de la déforestation, et les interactions entre les agriculteurs et l'environnement. Plus particulièrement, il s'agit de comprendre

- Comment les producteurs utilisent la terre ?
- Quelles sont les points clés qui influencent les dynamiques d'utilisation du sol ?

En référence à la figure 3 (cf. introduction, p. 20), il s'agit ici de se concentrer sur les petits colons, arrivés dans ce municipe au début des années 70, pour mieux comprendre leurs besoins (alimentaires, santé, argent, main d'œuvre, éducation, etc.), leurs stratégies de production et leurs interactions afin de retracer leurs itinéraires agricoles.

Ainsi, en prenant en compte les nécessités des acteurs, le modèle cherche à tester des scénarios prospectifs en produisant des informations originales pour l'élaboration de politiques publiques. Plus particulièrement, les questions portent sur les sujets de développement suivants :

- Comment contrôler l'avancée des fronts pionniers ?
- Comment concilier les aspirations des populations locales et la conservation d'espaces forestiers suffisamment grands pour maintenir la biodiversité naturelle ?
- Quelles gestions des ressources naturelles seraient en mesure de concurrencer le système coupe-brûlis-pâturage ?
- Quels systèmes pourraient rendre plus intéressante la poursuite de l'exploitation sur les aires déjà déforestées plutôt que de défricher de nouvelles parcelles forestières ?
- Comment intégrer des modes de gestion durable des ressources naturelles dans les paysages de front pionnier et dans la construction régionale ?
- Quelles sont les mesures et les politiques les plus appropriées pour parvenir à ces fins (mesures incitatives ou répressives, politiques d'accès au crédit, programmes de santé et d'éducation, ...) ?
- En quoi le savoir et le savoir-faire de l'agriculture traditionnelle peut-il servir l'agriculture pionnière ?

Si au départ, le projet cherchait à traiter l'ensemble de ces sujets, il est clair que dans un premier temps, il a fallu réduire l'éventail des objectifs. Or comme il a été souligné au 2^{ème} chapitre, l'identification d'une question de recherche pour un modèle n'est pas triviale. A la lecture des divers objectifs énoncés ici, on comprend qu'il était nécessaire de passer par une première phase descriptive ("formaliser et de synthétiser 15 ans de connaissances") pour se concentrer ensuite sur les activités agricoles des producteurs. Nous verrons par la suite comment la question de recherche à évoluer, aboutissant à de nouvelles version du modèle.

11.3.2 Autres modèles et avantages de la modélisation multi-agent {chap. 3}

On peut aussi se poser la question de l'intérêt de concevoir un nouveau modèle pour étudier un terrain si connu, objet d'attentions mondiales. Et d'ailleurs qu'est-ce que peut apporter un SMA pour aborder les problèmes amazoniens, sur un territoire plus grand que l'Europe ?

[Kaimowitz & Angelsen, 1998] présentent une revue des modèles (150) qui traitent de la déforestation des grandes forêts tropicales, dont nombreux se situent en Amazonie. Ainsi, il

apparaît que la plupart des modèles sont statiques (modèles statistiques pour quantifier les relations entre variables) et opèrent à des niveaux macroscopiques, allant pour certains jusqu'à représenter tout le bassin amazonien. Habituellement conçus à partir d'analyses de télédétection des changements d'occupation des sols, ces modèles se basent sur l'observation des tendances passées de la déforestation qu'ils extrapolent sur le futur selon une perspective optimiste ou pessimiste. Ils projettent ainsi les dynamiques actuelles en estimant les probabilités de création de nouvelles routes ou l'asphaltage des voies principales, l'accessibilité aux marchés (frigorifiques, laiteries, etc.), la mise en place de réserves indiennes, ou l'application de nouvelles réglementations publiques.

Dans la continuité de l'étude de Kaimowitz et Angelsen, [Piketty, 2003] propose une typologie des modèles amazoniens selon leur mode opératoire. Parmi ces modèles prospectifs, l'auteur distingue les modèles uni-variés des modèles statistiques multi-variés. Pour les premiers, il s'agit d'identifier la principale cause de déforestation pour ébaucher des scénarios en extrapolant les tendances passées. Pour les seconds, la méthodologie est semblable mais repose sur l'identification de relations entre la variable à expliquer (surface déboisée) et un ensemble de variables indépendantes considérées comme exogènes (tel que les niveaux des prix des intrants et des productions, l'accessibilité des marchés, la densité de population, ...) et qui sont propres à influencer la variable dépendante.

Par exemple, en constatant que le taux de déboisement le long des grands axes routiers est compris entre 29 % et 58% de la couverture initiale de forêt, [Nepstad et al., 2001] attribuent la cause de la déforestation à la construction ou à l'asphaltage de routes. Les auteurs critiquent alors le programme *Avança Brasil* (plus de 6000 km de nouvelles routes) en estimant que pour les deux décennies suivantes, la déforestation atteindrait entre 120.000 km² et 270.000 km² selon les scénarios (optimiste ou pessimiste). Sans nier l'importance de la route comme facteur de déboisement, [Piketty, 2003] explique que les principales faiblesses de ces types de modèles uni-variés sont que "(i) le déboisement est associé à une seule variable (présence de routes ou croissance agricole) (ii) que l'impact de la variable choisie sur le déboisement restera au même niveau que dans le passé (hypothèse de processus stationnaire)". Sur ce dernier point, [Poccard et al. 2005] expliquent que "cela peut conduire à des interprétations peu convaincantes comme celles supposant que les aménagements routiers continueront pendant les cinquante prochaines années à avoir le même effet qu'au cours des vingt dernières [Laurance et al., 2001], et donc des propositions inadaptées. Relayées par une diffusion efficace, celles-ci peuvent malgré tout avoir un impact fort dans le débat international sur les moyens de préserver la forêt amazonienne¹²³".

Certains modélisateurs estiment qu'un meilleur accès aux routes et aux marchés ainsi qu'une bonne qualité des sols augmentent la probabilité d'une zone donnée à être déforestée. Pour d'autres, la pauvreté et la déforestation sont fortement corrélées et cette relation est renforcée dans les zones isolées, loin des routes. Outre ces contradictions, ces modèles proposent des explications peu convaincantes des causes de la déforestation. Ainsi, une simple corrélation entre la présence d'une route et une zone déboisée est interprétée comme un lien causal de la route sur la déforestation. Mais il arrive souvent que les routes soient endogènes, c'est à dire qu'elles peuvent avoir été construites suite à une déforestation [Kaimowitz & Angelsen, 1998].

Etant donné qu'ils s'attachent à décrire les grandes tendances au niveau macroscopique, la plupart des travaux éprouvent des difficultés à saisir l'essence des phénomènes étudiés. Comme le remarque [Lambin, 1994], "à de telles échelles, le haut niveau d'agrégation des variables obscurcit la variabilité des situations et des relations ; moyenner ces données entraîne un aplatissage de l'information sans portée explicative". Par ailleurs, à l'exception de [Deadman et al., 2001] et [Caldas et al., 2002], les acteurs ne sont pas représentés dans ces modèles, si ce n'est sous forme de densité et de flux de population dans le meilleur des cas. Ainsi, en dépit de l'attention toute

¹²³ Les parutions dans *Science* de [Nepstad et al., 2001] et [Laurance et al., 2001] ont fait grand bruit.

particulière que l'Amazonie reçoit de la part de la communauté internationale, les connaissances sur les choix décisionnels des acteurs sont rudimentaires. Ces modèles de corrélation ne donnent qu'un éclairage partiel sur des processus qui restent mal compris:

Surprisingly little is known about how the characteristics of deforestation agents affect their behaviour. We know households that exhibit "full-belly" or subsistence type behaviour are less responsive to market signals, but existing models tell us little about how common such behaviour is. [...] Analytical models suggest both time preferences and risk aversion are important. But their practical effect depends on assumptions about the relevant investment decisions, and there is little empirical evidence on which to base such assumptions. [Kaimowitz & Angelsen, 1998]

Par conséquent, en se focalisant sur les acteurs, l'approche SMA paraît être un outil judicieux pour révéler certains éléments clés qui sont à l'origine de la déforestation. D'ailleurs, comparé aux autres modèles qui s'intéressent exclusivement à quantifier la déforestation, et en accord avec nos objectifs énoncés, nous nous sommes davantage intéressés à la vie des colons des fronts pionniers. Evidemment, ce travail est moins confortable. Il nécessite de se frotter davantage au terrain, qui peut être difficile parfois. Il faut aussi interviewer les acteurs, découvrir l'organisation de leur ferme, retracer leur histoire et identifier leurs réseaux sociaux, afin de mieux comprendre leurs difficultés et d'imaginer avec eux des évolutions alternatives.

11.4 DESCRIPTION DU MODELE : OUVRIR LA BOITE NOIRE { CHAP. 9 }

Jusqu'à présent, les modèles présentés dans cette thèse étaient relativement simples. Or il est plus difficile de présenter un modèle plus compliqué comme *TransAmazon* malgré notre volonté de rester au plus simple. La description dans le cadre de cette thèse n'est donc pas exhaustive mais tente d'expliquer la structure et le fonctionnement global du système en mettant la lumière sur quelques points précis. D'autres descriptions du modèle sont disponibles dans [Bonaudo, 2005], [Bonaudo et al., 2005] et [Viera Pak, 2008] ainsi qu'à annexe 4 (p. 298) et sur le site de Cormas : <http://cormas.cirad.fr/fr/applica/Transamazon.htm>.

La conception du modèle *TransAmazon* a commencé en 2004 et a été suivie de périodes de travail et d'arrêt. Aujourd'hui, plusieurs versions ont été réalisées. L'équipe de concepteurs est constituée de Jean-François Tourrand (Cirad), Thierry Bonaudo (AgroParisTech) et moi-même. *TransAmazon* est donc un modèle d'experts dans le sens où il n'a pas été conçu selon une démarche de modélisation participative telle que présentée par certaines expériences ComMod. L'effort principal a consisté à délimiter le cadre du modèle et à concevoir sa structure. Sans même écrire une seule ligne de code, il a fallu plusieurs mois à l'équipe pour réaliser les premiers diagrammes UML.

11.4.1 Délimitations

Les nombreuses informations accumulées sur Uruará ainsi que les SIG et bases de données, auraient permis de construire une véritable usine à gaz. Mais, malgré la disponibilité des outils, notre souci a été de synthétiser et de condenser les connaissances pour garder le contrôle sur le modèle. La partie la plus longue du travail a consisté à trier, hiérarchiser et synthétiser l'information disponible. Il a fallu identifier les éléments qui semblaient les plus pertinents, les caricaturer parfois, pour obtenir la structure la plus simple possible sans pour autant dénaturer notre objet d'étude. Car notre objectif n'est pas de reproduire la réalité, mais d'identifier les éléments clés et de comprendre la façon dont ils influencent les dynamiques à l'œuvre. La deuxième préoccupation était de produire un outil qui puisse être partagé avec les acteurs : obtenir un ersatz de leur situation pour ne pas impressionner par l'étalage d'outils "high-tech", mais plutôt pour laisser la porte ouverte à la discussion et à la remise en cause de notre travail.

Uruará est déjà une petite ville au sein d'un espace deux fois plus grand que le Lot-et-Garonne. Le municipe compte aujourd'hui 35.000 habitants. La carte ci-dessous montre le découpage foncier de la commune. La route transamazonienne la traverse d'Est en Ouest et tous les 5 km partent perpendiculairement à cet axe deux vicinales, vers le Sud et vers le Nord. La carte laisse apparaître des zones de chevauchements, en particulier entre la réserve indienne et des lots de 100 ha occupés par les petits producteurs, mais aussi au niveau des projets d'*assentamentos* (lotissements destinés à accueillir des familles de sans-terres).

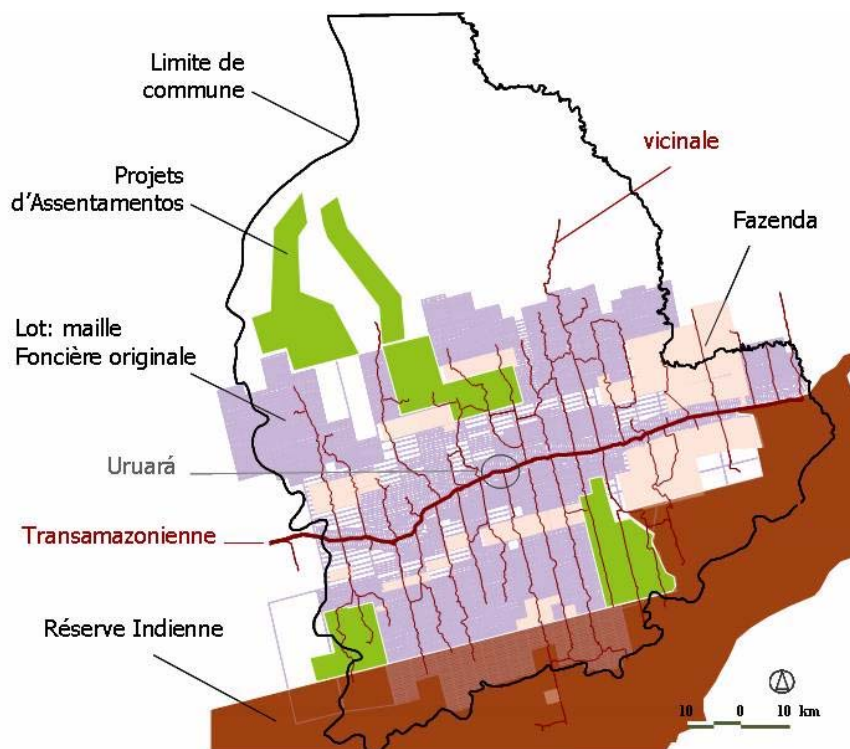


Figure 11-3: Carte foncière d'Uruará, d'après [Bonaudo, 2005].

Sur la base d'une structure initiale (lots de 100 ha), dessinée à l'origine par l'INCRA (cf. figure suivante), on constate donc des zones de chevauchements, sources de tensions. De plus, même si les grandes scieries ne figurent pas sur la carte, il est courant de voir apparaître des conflits avec les *madereiros* qui entrent parfois dans les propriétés et les réserves pour y extraire des arbres. Comme l'explique [Negreiros Alves, 2004], des tensions diverses pour l'accès à la terre et aux ressources surviennent régulièrement, sans parler des jeux de pouvoir et d'influences, ni du rôle des églises. Bref, comme pour la plupart des systèmes socio-environnementaux, il s'agit d'une zone sensible et complexe. On nous a parfois reproché de ne pas prendre en compte ces différents aspects dans le modèle et surtout de ne pas tenir compte des Indiens.

Or, comme il a été souligné au {chap. 2}, les objectifs du modèle nous servent à mieux délimiter ses dimensions, tant spatiales que sociales. En se référant à ces objectifs initiaux, on comprend que la cause des Indiens n'est pas à prendre en compte ici, ni les jeux de pouvoir, ni le poids des églises, ni même les actions des *madereiros*. En effet, la première cause de déforestation en Amazonie est essentiellement liée à l'action de l'agriculture. A Uruará, les fronts pionniers de déforestation progressent essentiellement sous l'action des petits producteurs. Le modèle doit donc s'attacher à décrire uniquement les activités de ces colons sur l'espace.

La figure suivante montre une photo satellite de la couverture végétale à Uruará où la zone déforestée forme ce qu'on appelle une arête de poisson. Cette structure particulière est liée à la configuration du réseau routier : tous les 5 km ont été tracées des routes vicinales (*travessão* en portugais). Certaines peuvent atteindre quelques centaines de kilomètres. Le modèle se limite alors à décrire la structure et les dynamiques de ces vicinales, divisées en lots simples sur lesquelles habitent et évoluent les familles des petits producteurs.

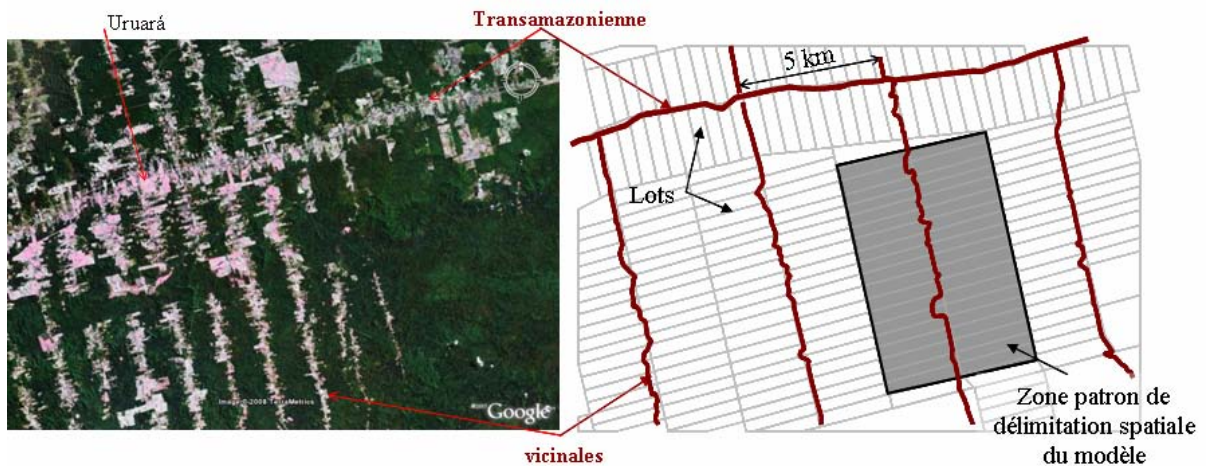


Figure 11-4: Uruará vu d'en haut. A gauche, photo satellite (source Google Earth) montrant la structure particulière en arête de poisson. A droite, schéma de la zone présentant le réseau routier et la configuration des lots.

11.4.2 Description de la structure

Conformément à ce que j'ai présenté au {chap. 9, "communication"}, les diagrammes issus des phases de conception ont été retravaillés en les épurant au maximum pour les présentés ici. Au final, le modèle présente une structure "relativement" simple, composée de trois parties : l'espace, le couvert végétal et les familles :

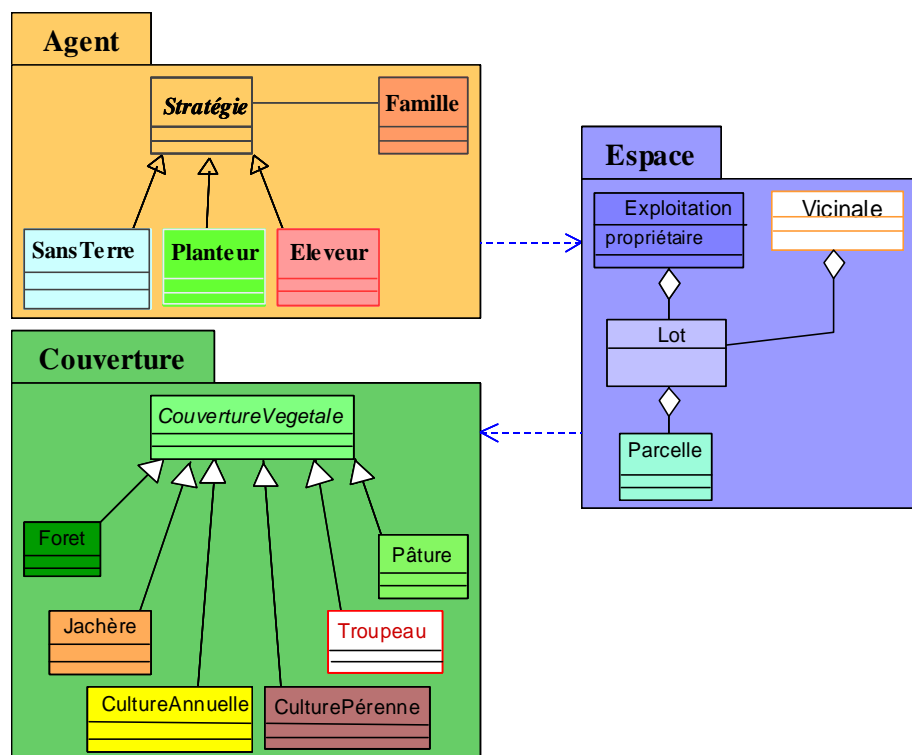


Figure 11-5 : Diagramme de package montrant la structure générale de TransAmazon.

11.4.2.1 L'espace

Des lots de 100 ha ont été cadastrés par l'INCRA le long des vicinales. Les lots de la "faixa" (bord de la Transamazonienne) sont considérés comme ayant une localisation privilégiée. "L'alqueire" est l'unité de mesure utilisée par les fermiers et vaut 5 ha. Elle a été choisie comme granularité spatiale minimale. Le diagramme de classes suivant montre la structure spatiale du modèle :

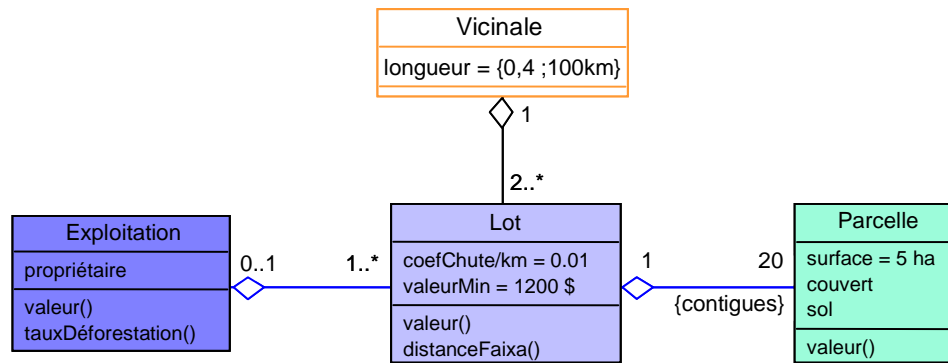


Figure 11-6: Une hiérarchie d'agrégation d'entités spatiales caractérise la structuration spatiale de TransAmazon.

Une exploitation, composée d'au moins un lot, est capable de calculer sa valeur monétaire (en cas de vente ou d'achat) ainsi que son taux de déforestation. Chaque lot est composé de 20 parcelles contigües. Sa valeur monétaire est la somme de la valeur de ses parcelles mais diminue avec la distance à la Transamazonienne sans pour autant descendre sous le seuil de 1200 \$. La parcelle est l'unité spatiale élémentaire. Certains l'appellent parfois le pixel et d'autres la cellule, mais en modélisation il est important de ne pas mélanger le vocabulaire technique avec celui du domaine ciblé par le modèle. La parcelle, donc, délimite une surface de 5ha sur laquelle on trouve un type de sol et un couvert végétal. L'exemple suivant montre une photo prise à l'entrée d'un lot entièrement recouvert de pâturage et un exemple de structure spatiale d'une vicinale.

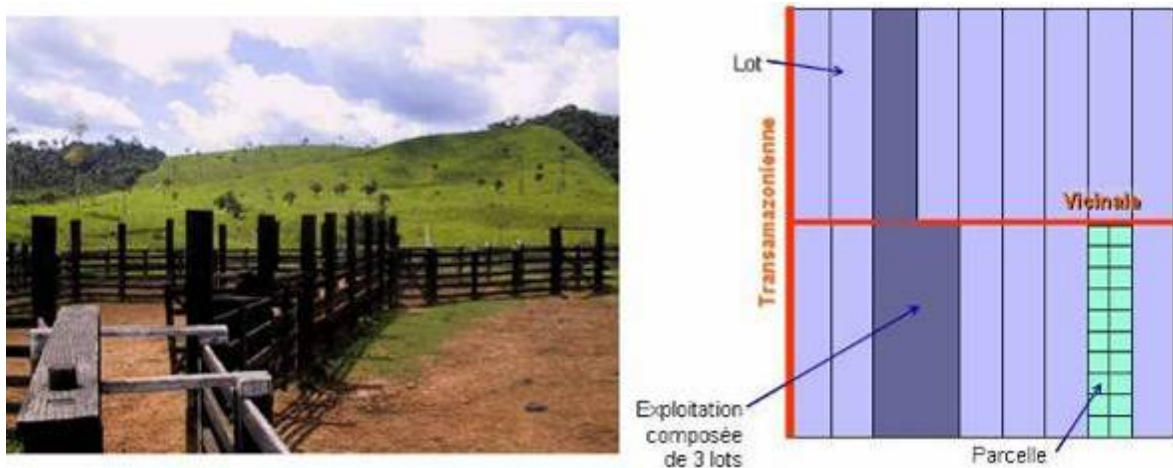


Figure 11-7: Photo d'un lot en pâturage entouré de forêts. Le schéma représente un exemple des éléments de la hiérarchie spatiale du modèle.

11.4.2.2 Les sols

Chaque couvert repose sur un sol dont l'indice de fertilité influence la production du couvert. Même si les pédologues estiment que cette classification est trop simpliste, nous avons suivi le vocabulaire des fermiers qui distinguent trois types de sol :

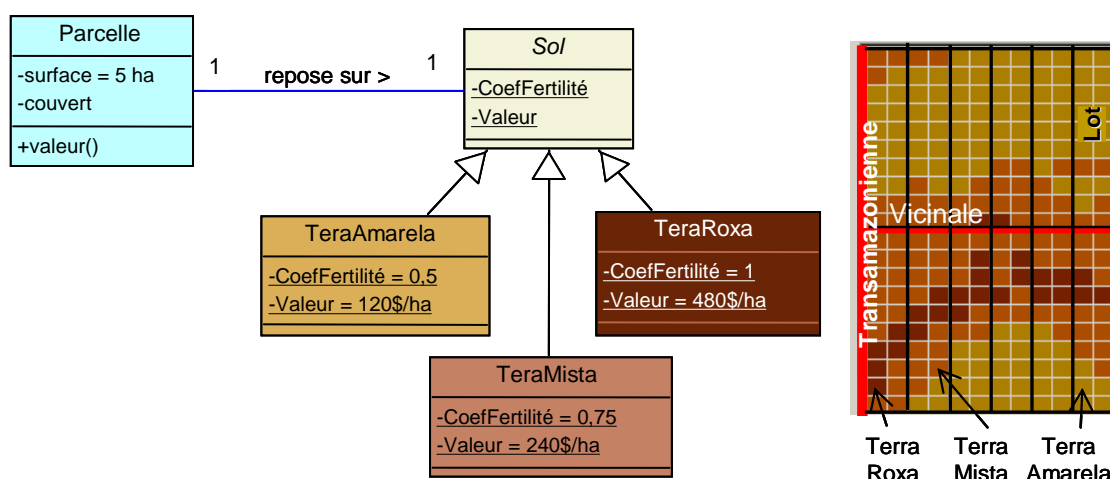


Figure 11-8: Les trois types de sols présents dans la région. Diagramme de classe et visualisation.

A chaque qualité de sol est associé un coefficient de fertilité qui influence la productivité de la végétation de la parcelle et par conséquent sa valeur monétaire. A Ururará, 10 % des terres sont de type *Roxa* (rouge, terre excellente), 50 % de type *Amarela* (jaune, terre assez pauvre) et 40 % de type *Mista* (mixte). Dans cette version du modèle, aucune dynamique n'est associée au sol : les cultures n'entraînent aucune dégradation de la fertilité. Etant donné l'importance de ce phénomène, il sera nécessaire d'introduire la dégradation et la récupération des sols dans les prochaines versions.

11.4.2.3 Le couvert végétal

A chaque parcelle est également associé un couvert végétal muni de sa propre dynamique. Sur une parcelle donnée, un couvert laissé à l'abandon changera naturellement de stade au cours du temps. Le diagramme de classes suivant utilise le "land-use pattern" [Le Page et Bommel, 2004] pour décrire cette structure.

Cette hiérarchie des couverts montre les différents types de végétation utilisés dans le modèle. Il s'agit à nouveau d'une simplification d'une réalité plus complexe. Chaque couvert possède un âge et une durée d'abandon et connaît son prochain stade évolutif (*Succession*). Ainsi, abandonné à lui-même, un paysage donné évoluera naturellement et progressivement vers la forêt (le climax des écologues)¹²⁴. Ce diagramme n'est pas suffisamment complet pour prétendre aider à la réplique¹²⁵. Il n'est conçu que pour présenter une partie du modèle et le discuter. Il a été présenté plusieurs fois à des acteurs qui en ont parfaitement compris le sens. Certains ont d'ailleurs proposé d'autres valeurs des attributs.

Le troupeau n'est évidemment pas un couvert végétal, mais la façon dont nous avons représenté sa dynamique sans prendre en compte le cycle de vie des vaches, s'est révélé finalement très proche d'une culture : en fonction des entretiens qu'il reçoit, il génère tous les ans une production (de viande) comparable à une autre culture. S'il n'est pas entretenu, sa productivité est réduite progressivement à l'instar des autres cultures et il fini par disparaître.

¹²⁴ Le diagramme d'état-transition de la végétation est présenté (Figure 11-14, p. 259).

¹²⁵ Pour cette première description, j'ai supprimé toutes les informations concernant les coûts en main d'œuvre et les coûts en argent qu'un agent producteur doit dépenser pour supprimer, implanter et entretenir un couvert donné. Ces informations sont présentées plus loin.

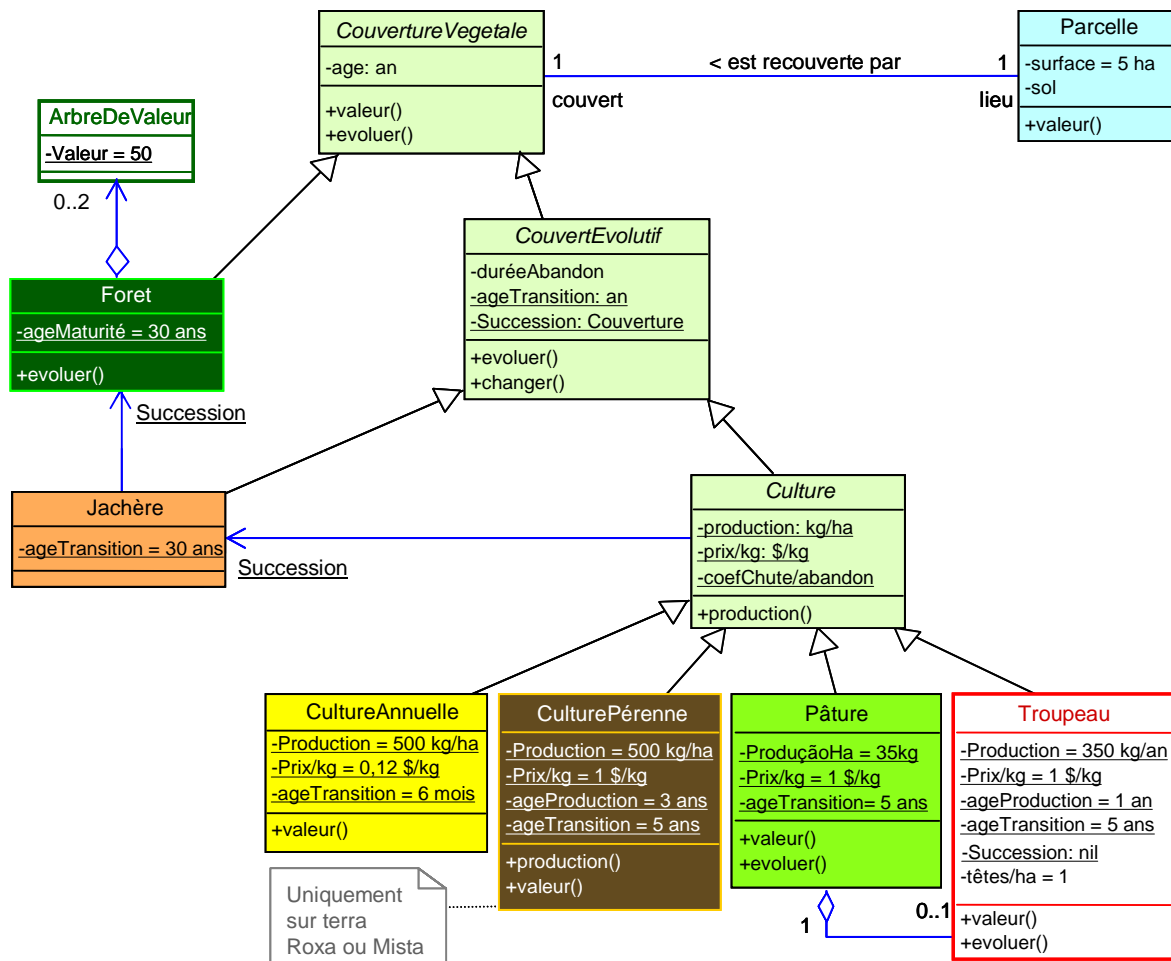


Figure 11-9: Utilisation du "Land Use Pattern" pour décrire la structure et les successions du couvert végétal (les attributs et les rôles soulignés correspondent à des variables de classe).

La culture pérenne dominante à Uruará est le cacao qui nécessite une bonne terre (*Roxa* ou *Mista*). Le cacao commence à produire au bout de 3 ans. La figure suivante montre un exemple de paysage végétal :

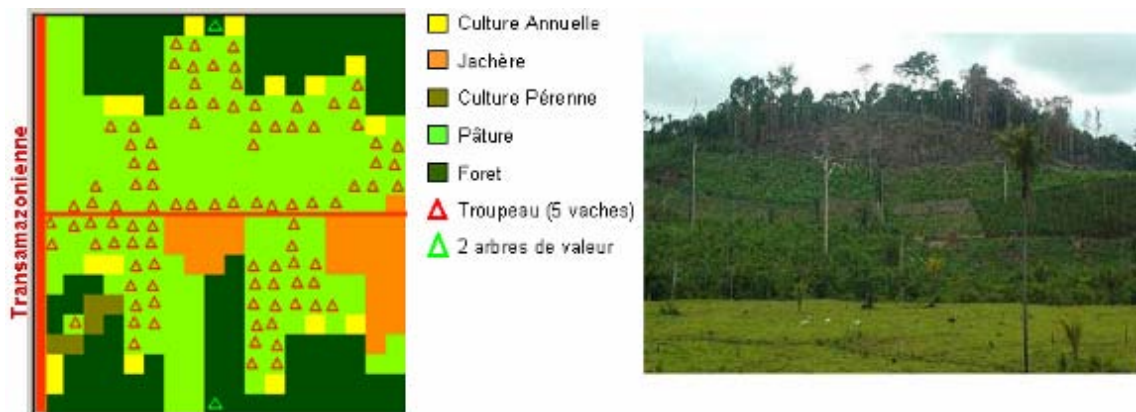


Figure 11-10: Vue du paysage végétal telle que représentée par le modèle (à gauche) ou sur une photo qui laisse apercevoir différents types de couvertures, du pâturage à la forêt primaire (à droite).

A partir de tous ces éléments, on est capable de faire évoluer naturellement les couverts végétaux, de calculer la production de chacun. On peut aussi calculer la valeur de chaque lot qui dépend des proportions de sols qu'il contient et de la valeur des couverts qu'il supporte. Cette valeur totale diminue en s'éloignant de la Transamazonienne :

$$V_{lot} = \text{Max} \left\{ 1200 ; \text{distance} \times \text{coefChute} \times \sum_{\text{parc}=1}^{20} V_{\text{parc}} \right\} \text{ avec } V_{\text{parc}} = V_{\text{couverture}} + V_{\text{sol}} \quad (11.1)$$

11.4.2.4 Les familles de colons

- Pas de dynamique démographique

Dans *TransAmazon*, un agent social personnifie une cellule familiale de colons. Ses membres, de 2 à 8, se partagent entre les actifs (main d'œuvre familiale) et les inactifs (enfants trop jeunes pour travailler). La répartition des membres par famille suit les données statistiques de l'IBGE sur Uruará (cf. Tableau 1 en annexe 4).

Ne voulant pas entrer dans les sujets trop complexes de mariage, de filiation, de décès et d'héritage, la famille ne se développe pas ; ses membres ne vieillissent pas, ni se reproduisent. Evidemment, ce n'est pas la réalité et les problèmes de succession et de division des terres sont un sujet de préoccupation pour les fermiers. Cet état figé de la population pose un problème que nous devrons certainement régler à terme. Mais étant donné les objectifs du modèle, cette dimension, trop complexe à concevoir ne nous a pas paru indispensable dans un premier temps. Par contre, elle empêche de mener des simulations sur le long terme.

La seule évolution de la population a lieu lors de l'exclusion définitive d'une famille du système qui ne parvient pas à survivre. Aussi, à partir d'un pool initial de familles, les simulations ne montrent jamais un accroissement de la population mais plutôt une légère diminution au cours du temps.

- Force de travail de la famille et coûts d'intervention sur la propriété

Pour survivre et se développer, chaque famille dispose de deux ressources : (1) sa main d'œuvre active (*MOactive*) qu'elle utilise pour ses travaux des champs ou pour travailler à l'extérieur, et (2) son argent (*solde*) qu'elle récupère lors des récoltes ou de la vente de sa main d'œuvre. Elle dépense cet argent par la consommation du ménage, par les coûts attachés aux travaux, par l'embauche de main d'œuvre occasionnelle et par l'achat de nouveaux lots. Sa main d'œuvre active est représentée comme une quantité de journées de travail disponible qui diminue au fur et à mesure des travaux des champs. En début de saison, le nombre de jours disponibles est réactualisé.

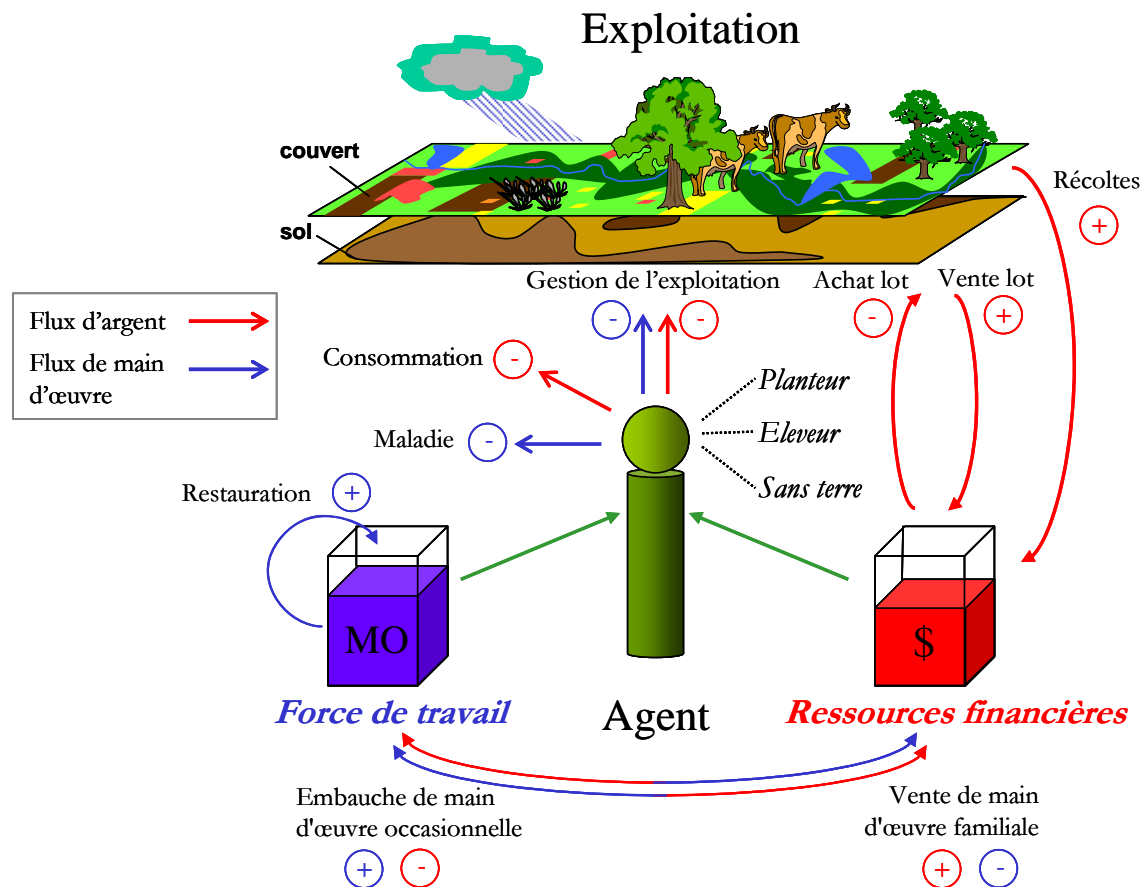


Figure 11-11: Diagramme systémique d'un agent. Pour se développer, l'agent dispose de deux ressources : sa main d'œuvre active et son argent. Il les utilise pour sa consommation et pour la gestion de son exploitation.

A chaque action d'un agent sur un couvert, un coût en main d'œuvre et un coût en argent sont respectivement retirés de sa force de travail et de son porte-monnaie. Ainsi, chaque type de couvert possède des informations sur les coûts à l'hectare en main d'œuvre et en argent pour supprimer, implanter et entretenir ce couvert. Pour ne pas surcharger le diagramme de la figure 11-9, les informations sont réunies dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11-1: Coûts en main d'œuvre et en argent pour supprimer, implanter et entretenir les différents couverts végétaux.

Couverture/Végétale	Forêt	Jachère	Culture Annuelle	Culture Pérenne	Pâturage	Tourbeuse
-age: an						
-CoutSuppression: \$/ha	40	10	na	na	na	na
-CoutImplantation: \$/ha	na	na	0	240	40	300
-CoutManutention: \$/ha	na	na	0	10	1	5
-MOsuppression: jour/ha	12	5	na	na	na	na
-MOimplantation: jour/ha	na	na	4	55	11	95
-MOmanutention: jour/ha	na	na	0	24	1	1

Ces informations agrègent des données très variées. Le coût d'implantation d'un pâturage par exemple regroupe le coût des semences, des intrants et du matériel ainsi que le coût de la clôture.

Le fruit des récoltes, effectuées en fin de saison, est directement transformé en argent selon la formule de la marge brute suivante :

$$marge\ brute = \sum_{lot_i} \left(\sum_{parc_j}^{parc_{30}} prodEffective(couvert.parc_j) \times prix(couvert.parc_j) \right)$$

Pour un rendement optimum, les cultures doivent être entretenues. Ceci correspond, dans la réalité, au nettoyage du pâturage, à l'entretien des clôtures, à la taille de la cacaoyère, etc. Si l'entretien est négligé, une durée d'abandon est incrémentée. Au-delà d'un seuil (*ageTransition*, cf. diagramme 11-9), la culture disparaît laissant place à une jachère. Avant ce seuil, le manque d'entretien réduit la production effective d'une culture :

$$prodEffective(cult) = production(cult) \times coefFertilité(sol) \times tauxAbandon(cult) \text{ avec}$$

$$tauxAbandon(cult) = coefChuteParAbandon(cult) \times duréeAbandon(cult)$$

La quantité de main d'œuvre disponible peut être vue comme un "stock" de journées de travail qui diminue avec les activités agricoles sur la propriété. En fin de saison, après la récolte, le surplus de main d'œuvre disponible est vendu à l'extérieur. Mais aucun agent du système n'achète effectivement ces journées de travail. Elles sont directement réinjectées dans les ressources financières familiales au tarif de 3,3 \$/jour (100 \$/mois).

En début de saison, le "stock" de main d'œuvre est réactualisé à son maximum. Cependant, étant donné que la santé constitue une réelle menace pour la survie des petits producteurs d'Uruará, ce facteur est pris en compte dans le modèle. En effet, les problèmes de santé pèsent lourdement sur les capacités de production des familles : les centres de santé sont chers et souvent très éloignés. De plus, pour y amener un malade, un adulte valide doit s'absenter, ce qui réduit fortement la main d'œuvre disponible pour effectuer les travaux des champs. Si le malade est lui-même un adulte, le coût pour la famille est rapidement catastrophique. A partir des données statistiques de l'IBGE, une probabilité de tomber malade a donc été calculée (*probaMalade* = 5%/semestre). A chaque début de saison, un tirage aléatoire est effectué pour chaque membre de la famille pour tester cette probabilité. Si un enfant tombe malade, la force de travail est réduite de 1. Si le malade est un adulte, 2 unités de main d'œuvre sont enlevées.

- Stratégies des agents

Pour la conception d'un modèle, un patron d'analyse (souvent appelé *design pattern*) permet de réutiliser des analyses robustes ayant déjà fait leurs preuves. Par exemple, le patron d'analyse "Acteur-Rôle", défini par [Coad, 1992], associe à chaque agent un rôle ou une stratégie. Il a été appliqué ici et offre un avantage indéniable au modèle. En effet, il permet de séparer l'agent en deux parties distinctes mais interconnectées : la famille et sa stratégie agricole. Cette séparation permet aux concepteurs de mieux se concentrer sur les activités agricoles des fermiers sans mélanger des notions rattachées strictement à la famille. De plus, la possibilité pour l'agent de choisir sa stratégie agricole et surtout de pouvoir en changer en cours de simulation constitue la véritable dynamique affectée aux agents. Ainsi l'alternance de stratégies au cours du temps engendre une diversité de parcours familiaux qui procure au modèle une richesse de comportements.

Dans *TransAmazon*, la stratégie se décline en trois spécialisations : "Sans-terre", "Eleveur" et "Planteur". S'il faut bien reconnaître que la première n'est pas vraiment le résultat d'un choix familial, les deux autres dépendent de décisions prises lors du bilan annuel de l'agent. Le diagramme suivant illustre la structure des agents :

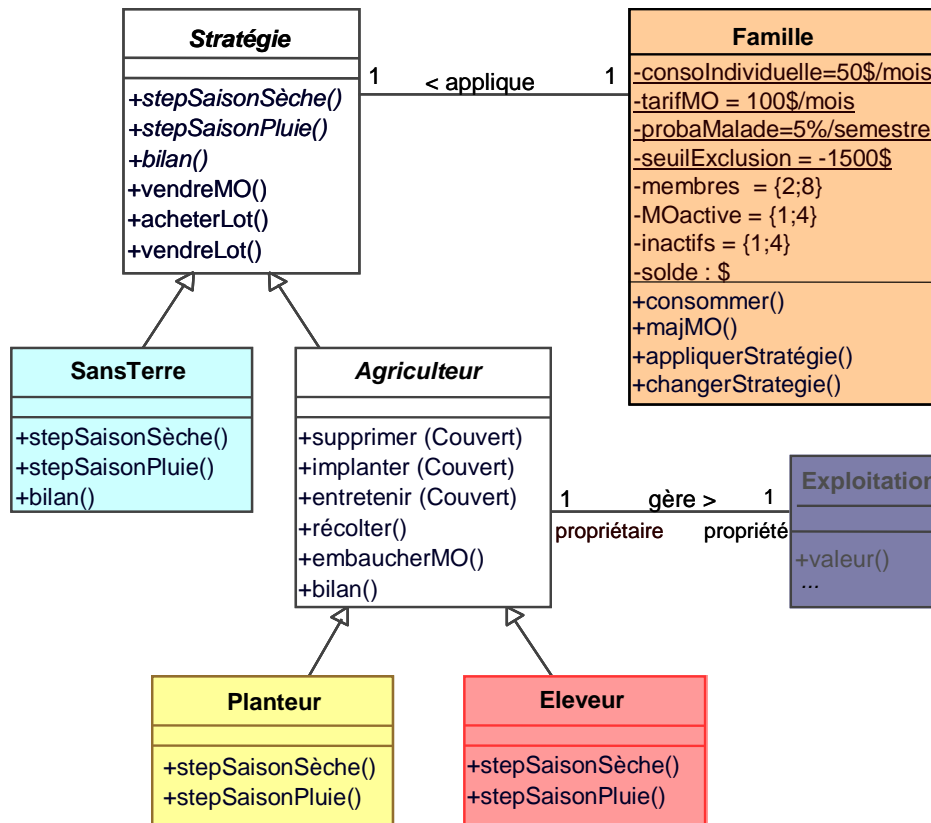


Figure 11-12: Diagramme de classe décrivant la structure d'un agent.

Les activités d'une famille sans-terre se limitent à la vente de sa main d'œuvre. En fin d'année, lors de son bilan, elle peut acheter un lot à vendre si elle possède suffisamment d'argent (le prix du lot + sa consommation annuelle). Dans ce cas, elle devient éleveur. Mais si son solde est inférieur à 1500\$ (seuil d'exclusion), la famille sort du système et l'agent est retiré de la simulation.

Une famille propriétaire d'au moins un lot peut choisir d'être planteur de cacao ou éleveur bovin. Elle cultive sa terre en privilégiant la spécialité qu'elle a choisie. Comme le montre les quelques diagrammes d'activité (en annexe), ce choix ne signifie pas nécessairement un abandon des autres cultures déjà en place sur le lot.

Ce fut évidemment l'élaboration de ce package "Agent" qui demanda le plus de temps et de discussions. Ainsi, Laura Ferreira propose dans sa thèse une classification des fermiers de la commune en six types : Sans-terre, Subsistance, Planteur, Eleveur, Diversifié et Accumulation [Ferreira, 2001]. Il aurait été simple d'intégrer cette classification dans le modèle comme l'aurait souhaité mes collègues. Mais l'étude détaillée des activités de chaque type à montrer des similitudes de comportements. Nous avons pris alors le risque de ne pas intégrer cette classification au profit de deux stratégies d'agriculteur plus caricaturales : Planteur et Eleveur. Or, grâce aux décisions des agents qui entraînent des changements de stratégies en cours de simulation, les sorties laissent apparaître les six typologies de fermiers identifiées à partir des seules 3 stratégies modélisées.

11.4.3 Description des dynamiques

11.4.3.1 Choix du pas de temps

Ne souhaitant pas utiliser une gestion événementielle du temps par soucis de simplicité et par manque d'expérience, il a fallu définir la durée minimale du pas de temps. En Amazonie, la saison des pluies et la saison sèche sont les deux périodes principales, qui orientent les activités agricoles. Néanmoins le climat est tellement chaud et humide qu'il autorise deux récoltes annuelles. Les calendriers agricoles que nous avons élaborés avec les producteurs au cours d'ateliers collectifs,

montrent un découpage des activités à l'échelle du mois, voire de la semaine ([Vieira Pak, 2008] et annexe). Pour éviter de descendre à de tels niveaux de granularité, la saison (6 mois) a été choisie comme unité temporelle de base. Exprimé sous forme d'une quantité qui diminue au fur et à mesure des activités, le "stock" de journées de travail disponibles pour la famille apparaît être une astuce efficace pour rester à ce niveau de granularité. Le pas de temps finalement choisi est l'année, mais elle est subdivisée en 3 périodes : saison sèche, saison des pluies et bilan annuel.

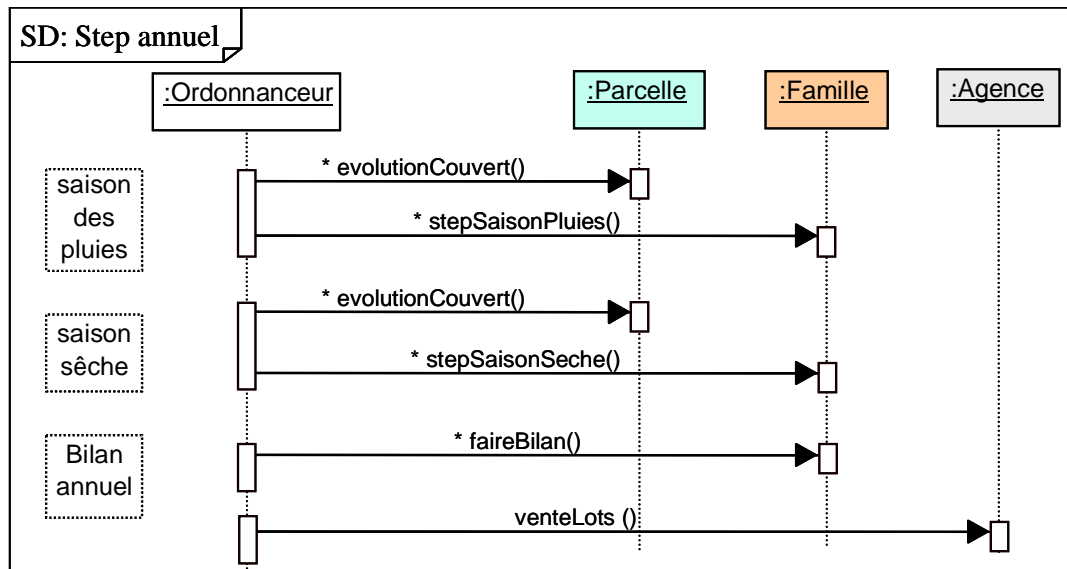


Figure 11-13: Diagramme de séquence d'un pas de temps annuel

11.4.3.2 Dynamique de la végétation

Sur la base du diagramme de classe 11-9, le diagramme d'état-transition suivant illustre la dynamique de changement d'état de la végétation. Deux catégories d'événements sont présentés : les événements naturels et ceux provenant d'activités agricoles.

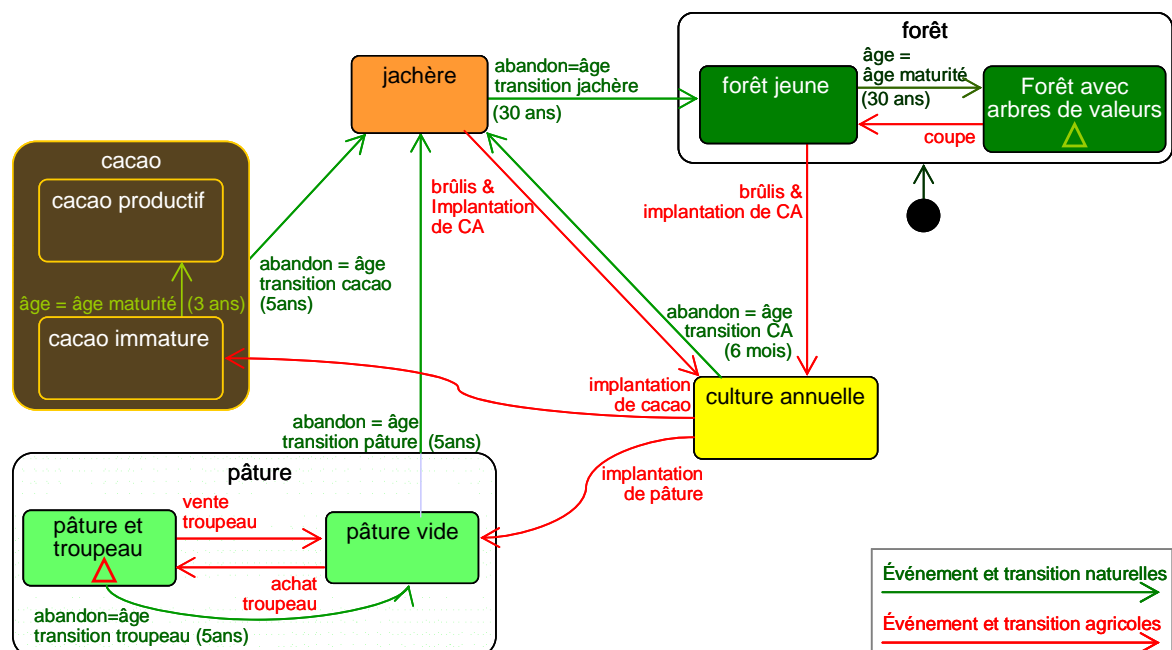


Figure 11-14 : Diagramme d'état-transition de la végétation.

Sur la base du diagramme de classe "Couverture" et des informations contenues dans le tableau 11-1, les agents peuvent calculer les profits issus de chaque culture qui correspondent à la moyenne des bénéfices des 3 dernières années (voir explications en annexe).

11.4.3.3 Dynamiques des acteurs

A chaque saison (sèche ou pluvieuse), les agents actualisent leur main d'œuvre, consomment, cultivent (selon leur stratégie agricole) et vendent l'excédent de leurs journées de travail (cf. figure suivante, gauche). En fin d'année, en fonction de leur bilan financier, ils peuvent acheter ou vendre du bétail. Si la situation est catastrophique, ils doivent vendre un lot au risque de devenir sans-terre. Par contre, s'ils en ont les moyens et si leur exploitation est déforestée à plus de 50%, ils cherchent à acheter un autre lot. Sur la figure suivante, le diagramme de séquence de droite montre le déroulement d'un scénario de crise d'un planteur, obligé de vendre un lot. Etant encore propriétaire, il décide alors de changer de stratégie pour privilégier l'élevage.

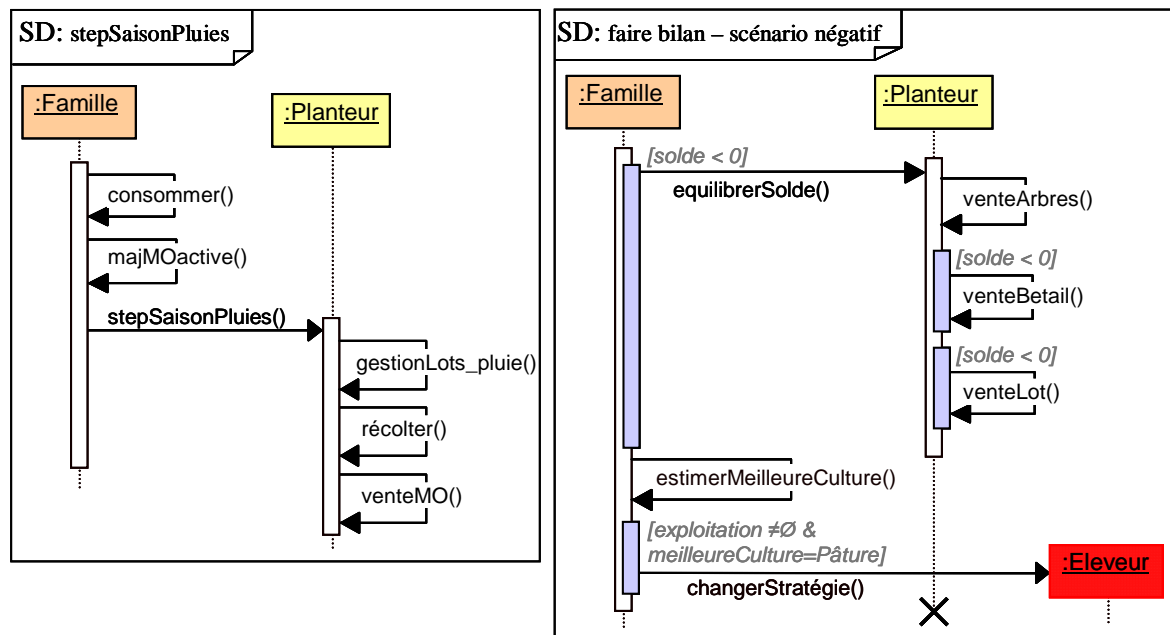


Figure 11-15: Diagrammes de séquence d'un agent planteur. À gauche, séquence d'activités de la famille pendant la saison des pluies ; à droite, exemple de bilan annuel pour un scénario négatif.

En saison sèche, la séquence des activités d'un agent est identique à celle décrite par le diagramme de gauche, à l'exception de l'activation de la stratégie (*stepSaisonSèche*). Les diagrammes d'activité des agents (en annexe) montrent que pour une stratégie donnée, la famille privilégie un type de culture sans pour autant délaisser complètement les autres. Dans le cas d'un éleveur par exemple, il implante des nouveaux pâturages et achète du bétail. Mais il continuera d'entretenir son cacao pour ne pas perdre tout l'investissement qu'il avait engagé auparavant.

Ce modèle n'étant pas le sujet de cette thèse, des descriptions des activités des agents sont présentées dans la thèse de T. Bonaudo [2005], sur le site de Cormas et quelques diagrammes d'activité et d'état-transition en annexe. Mais pour illustrer la partie 2, je souhaite montrer comment certaines astuces permettent de faciliter la gestion du temps et des interactions.

11.5 GESTION DU TEMPS, DE L'AUTONOMIE ET DES INTERACTIONS {PARTIE 2}

11.5.1 Un modèle sans difficultés pour l'activation des entités {chap. 6}

L'originalité du système étudié ainsi que les précautions prises, font de *TransAmazon*, un modèle sans grandes difficultés en ce qui concerne la gestion du temps et des interactions. En effet,

comme le montre le diagramme de séquence général (figure 11-13), l'activation des entités ne nécessite aucun tri ou brassage aléatoire en préalable¹²⁶. Ceci est dû au fait que :

- Il n'y a pas de phénomène de diffusion (de semences par exemple) ni d'écoulement au niveau des dynamiques naturelles.
- Nous avons fait l'hypothèse que les agents sont individualistes : ils décident seuls de leurs activités agricoles sur leur propriété. Les actions des uns n'interfèrent pas sur celles des autres.
- Les seuls moments où le "multi" de SMA entre en jeu se situe en fin d'année, lorsqu'ils comparent les résultats de leurs voisins avec les leurs pour décider ou non d'un changement de stratégie. Mais ce bilan est effectué *après* que toutes les activités de culture aient été terminées (cf. diag. Séquence général, 11-13). A cet instant de la simulation, la comparaison s'établit sur la base d'un état du monde identique pour tous {chap. 5}.
- Il n'y a pas un marché du travail pour la vente et l'achat de main d'œuvre. Celle-ci est juste une force de travail que l'on vend ou que l'on achète selon les besoins. Ainsi, en fin de saison, une famille vend son surplus de main d'œuvre, mais à personne en particulier. Elle reçoit juste une somme d'argent proportionnelle au "stock" de travail qui lui reste. De même, un propriétaire plus fortuné peut embaucher de la main d'œuvre à tout moment pour ses travaux des champs sans utiliser la force de travail des autres agents.
- Comme il est expliqué ci-dessous, les échanges de biens fonciers ne s'effectuent pas de gré à gré, mais obéissent à un procédé centralisé de type commissaire priseur.

Ces précautions prises pour la gestion des interactions suppriment les effets sensibles liés à l'ordre d'activation des agents et qui peuvent générer de grandes incertitudes sur l'évolution d'un SMA. Les simulations n'en restent pas moins difficiles à analyser car le modèle n'est pas si simple, mais au moins, cette difficulté n'est pas affectée par la façon dont les interactions sont gérées.

11.5.2 Simplification des interactions : échanges de lots par la technique du commissaire-priseur {chap. 7}

Au cours du temps, les agents peuvent vendre leurs lots s'ils ne s'en sortent pas financièrement (cf. figure 11-15, droite). A terme, ils peuvent donc devenir sans-terre, voire être complètement exclus du système. Ils peuvent aussi acheter des lots qui les intéressent lorsqu'ils en ont les moyens. Ces échanges qui ont effectivement lieu à Uruará sont complexes et obscures. De plus, un travail d'investigation à ce sujet n'est pas sans risque. Cependant, ces questions ne sont pas au cœur des objectifs du modèle. Certes elles doivent influencer les dynamiques d'utilisation de la terre, mais la manière exacte dont ont lieu les transactions foncières n'est pas un facteur déterminant de l'évolution des couverts.

J'ai donc pris le choix d'en faire un échange centralisé qui limite ainsi les artéfacts liés à l'ordre d'activation des agents et d'autres ajouts de tirages aléatoires. Pour ce faire, j'ai rajouté dans le modèle une agence immobilière : une entité qui n'existe pas à Uruará. Cette agence achète sans discuter les lots vendus par les fermiers au prix de leur valeur (cf. équation 11.1). En fin d'année, elle propose à tous les agents d'acheter les lots à vendre selon une procédure de type vente aux enchères (deux diagrammes d'activité de ces deux procédures sont présentés en annexe). Tous les agents sont donc au courant des lots à vendre ; il n'y a pas d'asymétrie d'information. De plus le processus est centralisé et la vente n'est effective qu'à la fin d'une transaction complète. En d'autres

¹²⁶ L'ordre d'activation des entités obéit à un découpage du pas de temps en 3 périodes. Pour chaque saison, toutes les parcelles et les familles sont activées (symbole * devant le message) selon l'ordonnancement préétabli, c'est à dire en suivant la liste des entités telles qu'elles ont été créées à l'initialisation (concrètement l'ordonnanceur les active en commençant en haut et à gauche, jusqu'en bas à droite). Mais cette ordre ou un autre n'influencent pas les résultats.

termes, il n'y a pas de vente directe de gré à gré sur la base d'une relation de voisinage ou de réseau. Evidemment cet artifice ne reflète pas la situation réelle et privilégie les agents les plus fortunés (bien que les transactions réelles les privilégient aussi). Mais il simplifie la procédure et permet d'éviter des biais liés à l'ordre d'activation des agents¹²⁷.

11.5.3 Pas de protection particulière de l'autonomie {chap. 6}

Le fait que les agents soient individualistes et qu'ils décident seuls de leurs activités, peut être considéré comme une forme d'autonomie sociale ("autonomie faible", {chap. 6}). Etant donné que les cultures qu'ils implantent sur leur propriété n'interfèrent pas sur celles des autres, il n'y a pas d'interaction directe (interaction forte) ni indirecte (interaction faible) durant les deux saisons annuelles.

En fin d'année par contre, on constate des interactions entre agents lors des changements de stratégie ou lors des ventes de lots. Dans le premier cas, observer les rendements et les cultures de ses voisins peut influencer la décision de l'agent. Son autonomie vis-à-vis des autres est altérée, mais cette comparaison ne dénature pas son intégrité décisionnelle.

En ce qui concerne les ventes et achats de lots, il s'agit en réalité d'interactions directes entre colons. Comme pour tout échange marchand mettant en relation deux individus, une telle transaction aboutit à la modification de l'état de chacun : les quantités de marchandises et d'argent de chaque individu sont modifiées. Appliqué aux SMA, une interaction directe de ce type peut entraîner une perte de l'intégrité informatique de l'agent : ses variables d'état risquent d'être modifiées directement par l'autre entité¹²⁸. Mais la technique du commissaire-priseur utilisée ici évite de mettre en place une protection de l'autonomie. Elle modifie la relation de vente entre les agents qui devient une interaction indirecte.

11.6 PREMIERS RESULTATS

11.6.1 Le simulateur

Le modèle a été implémenté sur Cormas. Le code est disponible sur la page TransAmazon.htm du site. A noter que cette phase a été relativement rapide (2 – 3 semaines) car la conception a été menée de façon approfondie. De plus, l'utilisation d'une plateforme de simulation permet d'éviter le développement d'interfaces de visualisation ou de sauvegarde de données. Il faut enfin préciser que l'utilisation de design patterns (hiérarchie d'agrégation, "land-use pattern" et acteur-rôle) facilite le codage. En particulier, le polymorphisme a été utilisé à fond ce qui évite de répéter du code et réduit la possibilité d'erreur.

11.6.2 Exemple d'une simulation

L'exemple suivant illustre une simulation sur 25 ans. A partir d'un espace vierge sur lequel deux vicinales ont été percées sur 44 km (100 lots), 400 familles sont créées et 200 d'entre-elles ont

¹²⁷ Ce procédé n'est pas sans rappeler un artifice plus ancien utilisé par Walras : "Pour fixer le prix d'équilibre entre une offre et une demande, Léon Walras avait perçu la difficulté de représenter les anticipations des agents dans les modèles. Il avait évacué le problème en imaginant l'intervention d'un commissaire-priseur qui aurait organisé à chaque période une vente aux enchères de tous les biens et de tous les facteurs de production, les transactions n'intervenant effectivement que lorsque l'équilibre aurait été trouvé " [Boussard et al., 2005]

¹²⁸ Sous-estimer l'impact de cette perte d'autonomie peut conduire à des comportements aberrants tels que ceux observés lors de l'achat de poisson dans *Mopa* (page 117). Sans nécessairement utiliser une architecture particulière pour protéger l'intégrité informatique de l'agent (autonomie forte), on peut éviter ces anomalies en prévenant l'agent qui a "subit" la transaction, de mettre à jour son état interne et de réviser ses décisions (page 122).

reçu un lot. La stratégie pour chacune de ces familles propriétaires est tirée aléatoirement (50% de chance de commencer éleveur ou planteur).

11.6.2.1 L'évolution du paysage dépend des choix de cultures

Une simulation standard montre que l'évolution du paysage crée progressivement la forme d'arête de poisson typique (voir graphiques des successions paysagères en annexe). Outre une représentation spatiale dynamique, le simulateur permet de suivre l'évolution de nombreux indicateurs au niveau individuel : évolution de la couverture végétale d'une parcelle ou d'un lot, les bénéfices de chaque agent, son type, ses ventes et ses achats, la taille de son exploitation, etc. On peut également suivre des indicateurs globaux, tels que le nombre de familles, leur type, leur capital, leurs bénéfices, leurs stratégies, ou bien le nombre de ventes et d'achats ou encore la taille de chaque couvert.

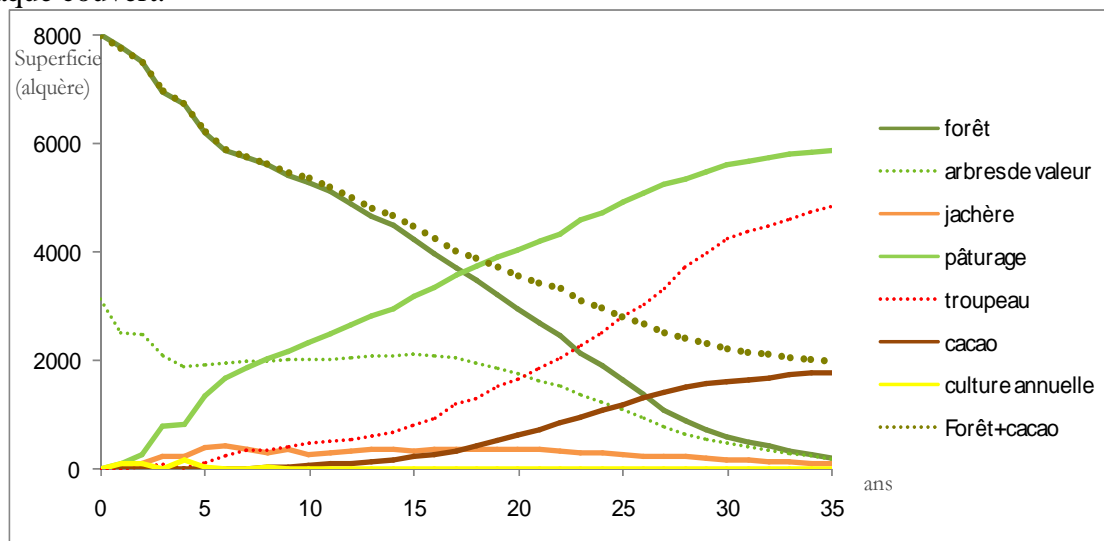


Figure 11-16: Evolution des couverts végétaux au fil des années.

Ce graphe montre que les 40.000 ha de forêt (8.000 parcelles de 5 ha) cèdent progressivement la place à une vaste prairie de pâturages. C'est en effet l'élevage qui prédomine sur les autres cultures même si sa rentabilité est réduite. Contrairement au cacao qui ne produit qu'à partir de la troisième année, l'élevage est rapidement rentable. Ses coûts d'implantations et d'entretiens sont faibles. De plus, si le bénéfice est limité, le troupeau constitue une garantie face aux risques : en cas de besoin, il est toujours possible de vendre quelques vaches. C'est une sécurité fondamentale pour ces familles soumises aux aléas du climat, de la santé et du marché. D'ailleurs, si le cours mondial de la viande reste bas, sa stabilité est un atout considérable pour les producteurs [J.F. Tourrand, comm. pers.]. Enfin, de nombreux colons sont originaires du sud du Brésil et ont gardé leur tradition *gaucha* basée sur l'élevage. Ces éléments (origine et gestion du risque) ne sont pas pris en compte dans le modèle si ce n'est par une certaine préférence pour la stratégie Eleveur. Mais au cours des simulations, on constate des ventes de bétail lors de crises familiales, ce qui permet de les surmonter temporairement.

Le cacao ne permet pas cette souplesse. A moins de vendre son lot en entier, il n'est pas possible de céder une parcelle de cacao en cas de besoin. De plus, l'investissement nécessaire pour planter et entretenir une cacaoyère, réclame un lourd effort financier et mobilise la majeure partie de la force de travail. En outre, cet engagement, tant en argent qu'en main d'œuvre, ne porte ses fruits que trois ans plus tard. Certes, la rentabilité est alors très profitable, mais la famille doit pouvoir surmonter ces années non productives qui nécessitent un entretien continu. Enfin, le plus grave danger vient des fluctuations des prix du cacao¹²⁹. Cette simulation ne présente pas de

¹²⁹ Les multinationales de l'alimentation s'appuient sur la compétition entre producteurs pour assurer leur main mise sur ce marché et jouer sur les cours du cacao. Dans un rapport de la délégation de l'assemblée nationale pour l'Union

variation des tarifs, mais une version du modèle possède une entité *Marché* qui fait osciller les cours du cacao. Dans ce cas, les conséquences pour les producteurs sont significatives et ils se tournent encore davantage vers l'élevage avec les conséquences que cela entraîne sur l'environnement.

Car l'impact environnemental du cacao est bien moindre. Contrairement au pâturage qui met les sols à nu, la culture du cacao évite les phénomènes d'érosion ; la biomasse végétale reste importante (puits de carbone) ; l'évapotranspiration continue à alimenter le cycle de l'eau dont le rôle est primordial pour le climat de l'Amazonie. Certes, en coupant une partie de la forêt, le cacao contribue à éroder la biodiversité, mais la présence d'arbres pour protéger les pieds de cacao du rayonnement solaire permet d'abriter une faune végétale et animale¹³⁰. C'est pour toutes ces raisons que j'ai réuni les superficies de forêt et de cacao en une courbe sur le graphe précédent.

Les résultats comparatifs sur les prix du cacao (en annexe) montrent donc qu'une stabilisation des prix, incite les producteurs à s'orienter vers la stratégie planteur, ce qui résulte en de meilleurs gains pour la famille et dans le même temps à une réduction de la déforestation. C'est en quelque sorte une situation gagnant-gagnant.

11.6.2.2 Une typologie retrouvée

Comme expliquer dans la description du modèle, les agents sont uniquement créés en début de simulation. Il n'y a ni reproduction ni arrivée de nouveaux colons. La seule dynamique démographique est liée à l'exclusion des agents trop endettés. Les graphes suivants montrent l'évolution de la population et des différentes stratégies. Pour chacune, le capital moyen est présenté.

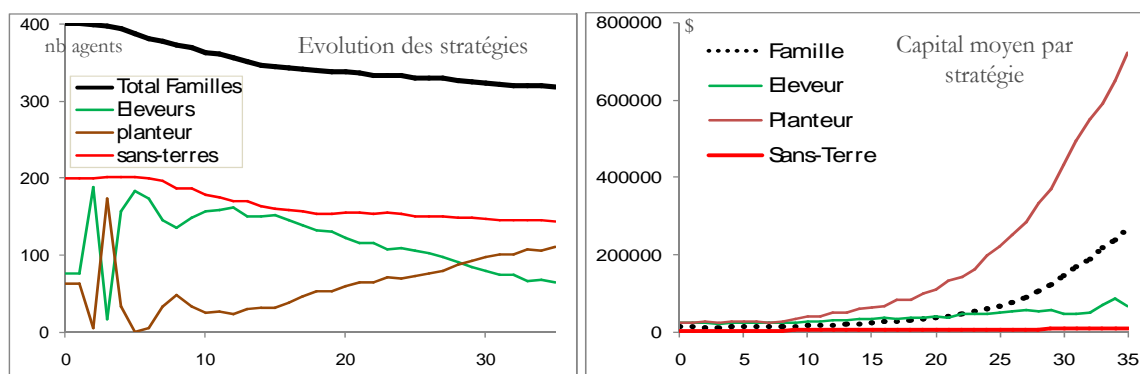


Figure 11-17 : Evolution de la population et des stratégies (à gauche). Capital moyen par stratégie (à droite)

Européenne, le député François Guillaume rapporte une analyse sur la sécurité alimentaire des pays du Sud, et son lien avec les règles de l'OMC. Il explique en particulier que "les filières de production agricole sont de plus en plus dominées par quelques multinationales et sociétés de distribution, un phénomène qui est à l'origine de l'écart croissant entre les prix à la production, les prix mondiaux et les prix à la consommation dans les pays développés" [Guillaume, 2004]. Soutenus par l'OMC, les marchés internationaux ont été progressivement libéralisés : fin des grands accords internationaux sur les produits agricoles (café, cacao) et réduction des protections douanières et tarifaires. Les paysans sont alors en prise directe avec le marché mondial caractérisé ces derniers temps par une forte instabilité des prix. Les cours du cacao se sont certes redressés progressivement ces deux dernières années car l'Amérique latine a réduit sa production. Mais le redressement enregistré à partir de 2000 a commencé à s'essouffler à la fin de 2003 car l'offre est redevenue surabondante. Le marché a été ensuite affaibli par la concurrence de l'"équivalent beurre de cacao", une directive de l'UE ayant autorisé l'ajout de matières grasses végétales non issues du cacao pour remplacer le beurre de cacao dans le chocolat.

¹³⁰ Le cacao est un petit arbre de 5m de haut qui craint les rayons directs du soleil. Pour le protéger, les producteurs ont commencé à implanter des arbres de valeur (Acajou, Ipê, Jatobá, Teck, ...) dans leur cacaoyère en espérant en tirer un bénéfice à l'avenir. Ainsi, lors de la visite de son exploitation, M. Cirilo, un petit planteur, m'a demandé si je n'avais pas l'impression d'être en pleine forêt. Ce qui était exact.

Durant les 25 premières années de la simulation, la stratégie éleveur est préférée par rapport aux planteurs, le temps de "bien nettoyer" la forêt. Pourtant le revenu du cacao est supérieur à celui de l'élevage. Les agents ayant essayé le cacao les 2 premières années, se ravissent rapidement par manque de moyen et surtout de productivité. Au bout de quelques années, certains producteurs reviennent progressivement à cette activité. Le capital de ces familles augmente alors très rapidement et dépasse de beaucoup celui des éleveurs. A tel point qu'il tire vers le haut le capital global de l'ensemble des familles.

Mais cette progression économique ne doit pas cacher des disparités entre agents. Comme le montrent les graphes suivants, certains s'en sortent très bien, mais pour d'autres, la vie n'est pas un long fleuve tranquille ; sans parler des exclus...

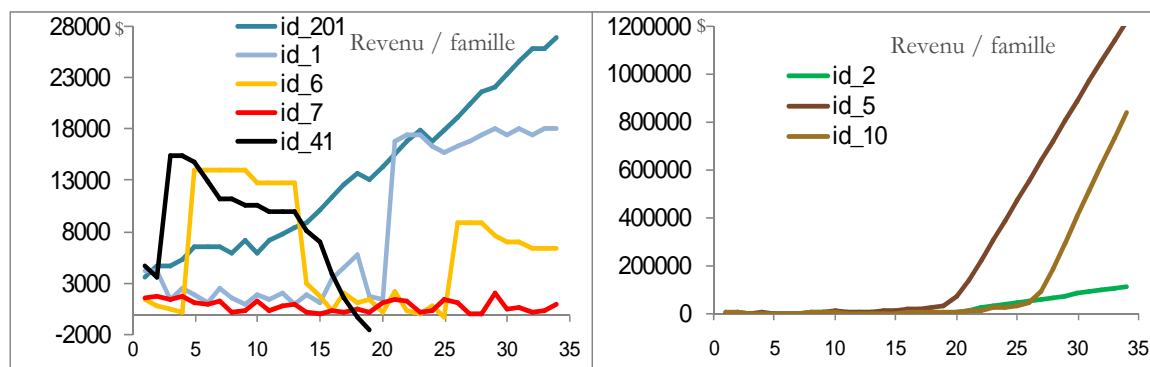


Figure 11-18 : Quelques exemples de trajectoires individuelles. A gauche, plutôt difficiles alors qu'à droite, les familles s'en sortent d'une façon incommensurablement mieux.

[Ferreira, 2001] propose de répartir les acteurs en 6 types : Sans-terre, Subsistance, Accumulation, Planteur, Eleveur et Diversifié. Cette typologie se base sur les structures productives des exploitations mais intègre aussi le niveau économique des colons. [Bonaudo, 2005] note que ces caractéristiques ressortent aussi avec une ACP. L'axe 1 du graphe de l'ACP, explique-t-il, correspond aux conditions socio-économiques et à la stabilité du système alors que l'axe 2 correspond à la spécialisation élevage ou cultures pérennes (cf. figure suivante).

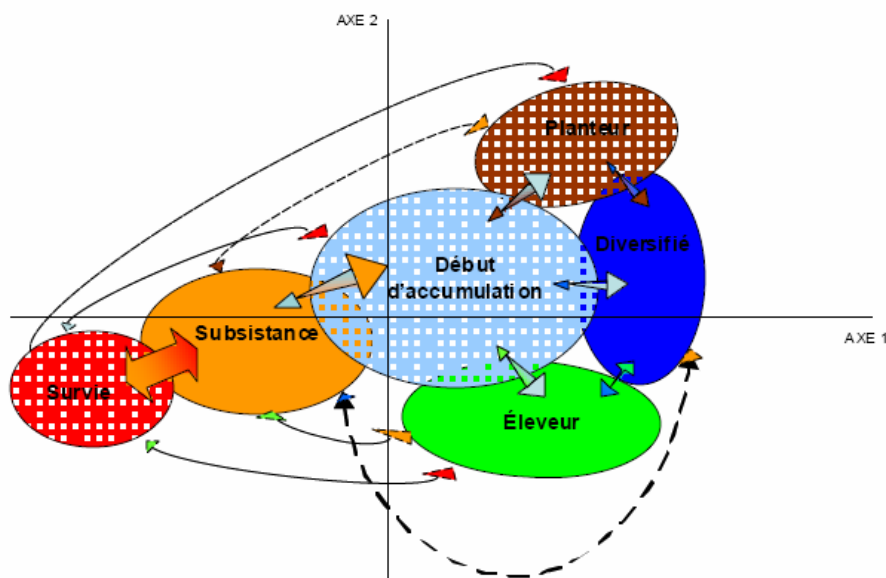


Figure 11-19 : Trajectoires d'évolution des exploitations agricoles en trente ans de colonisation, d'après [Ferreira, 2001] et [Bonaudo, 2005].

Au cours des trente dernières années, la répartition des acteurs par type a changé. "Il y a eu un glissement du barycentre de chaque groupe reflétant une certaine amélioration des conditions économiques à l'intérieur de chaque type" [ibid.].

En transférant le calcul de cette typologie (cf. annexe) dans le simulateur, on retrouve une relative similarité de la répartition de l'évolution des types d'acteurs avec celles des agents :

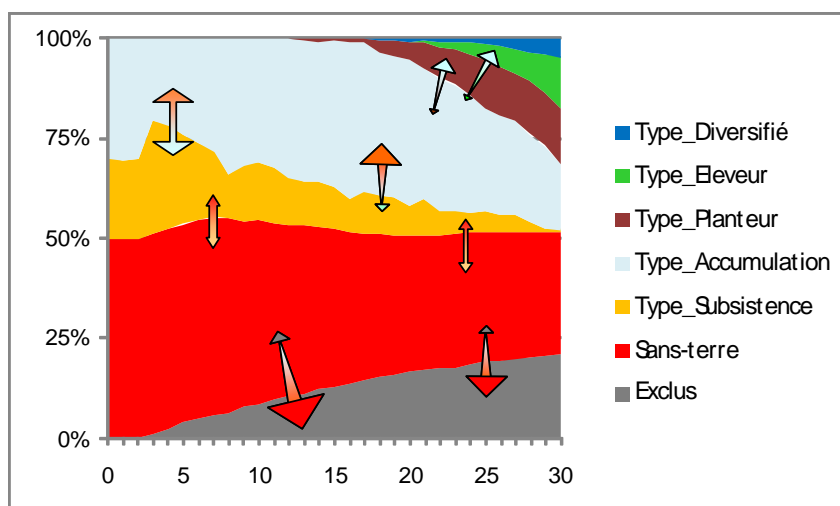


Figure 11-20: Evolution des typologies d'agents et passages des uns aux autres.

Ainsi, la simulation, en déroulant le temps du modèle {chap. 4}, montre une diversité de trajectoires. A partir de seulement deux stratégies caricaturales de production, on retrouve alors les sept types de colons ainsi que leurs passages successifs à travers ces catégories.

11.6.3 Analyse de sensibilité {chap. 8}

Une exploration détaillée a permis de vérifier la bonne marche du simulateur en suivant pas à pas les décisions et les activités des agents {cf. Analyse de la structure, chap. 8.1, p. 175}. L'utilisation d'un langage interprété comme *Smalltalk* facilite grandement cette tâche car il permet d'examiner en détail l'évolution des agents. Sans avoir à stopper la simulation, on peut aussi relancer des opérations qui semblent étranges. En modifiant à la volée la valeur d'un paramètre ou en plaçant volontairement un agent dans une situation extrême, on vérifie ainsi la cohérence de ses comportements. De plus, en dégradant volontairement des parties du modèle, j'ai isolé certains modules afin de tester leur fonctionnement dans des situations diverses : évolution naturelle de la couverture végétale, ventes et achats de lots, changement de stratégie, invasions, etc.

A ce jour, seules des études de sensibilité locale (cf. p.179) ont été menées sérieusement. Ce travail a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles du modèle et les hiérarchiser. J'ai étudié les réponses du modèle sur trois indicateurs qui reprennent les trois piliers du développement durable : le taux de déforestation (préservation de l'environnement)¹³¹, le capital de la communauté (viabilité économique) et le taux d'exclusion des sans-terres (équité sociale). Concrètement, les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus en initialisant chaque simulation toujours sur un même état : même carte des sols, espace de 2 fois 20 lots entièrement en forêt, 50% des lots initiaux attribués à des fermiers dont la composition familiale reste identique et dont les stratégies sont préétablies (10 éleveurs et 10 planteurs). Les 10 autres lots initialement non-affectés sont susceptibles d'être achetés au cours de la simulation par les 20 fermiers ou par les 20 familles de sans-terres. A partir de cet état prédéfini, 100 simulations de 30 ans sont répétées pour chacun des 31 principaux paramètres du modèle dont les valeurs sont réduites de 15% à tour de rôle. Pour chaque simulation, les 3 indicateurs sont enregistrés : la taille de la forêt à 30 ans, le capital foncier et financier de l'ensemble des agents et le nombre d'agents sans-terres et exclus. La sensibilité de

¹³¹ Contrairement à ce qui a été dit précédemment, cet indicateur n'agrège pas la taille de la forêt et du cacao, car dans ce cas, cet indicateur forêt-cacao est très corrélé à l'indicateur Capital. En effet, comme on l'a vu précédemment (fig. 11.18 droite), après des débuts difficiles, les producteurs de cacao tire le capital de la communauté vers le haut.

chaque indicateur est calculée selon l'équation 8.5 (p. 180). Le graphique suivant présente la sensibilité agrégée de ces trois indicateurs (équation 8.6) :

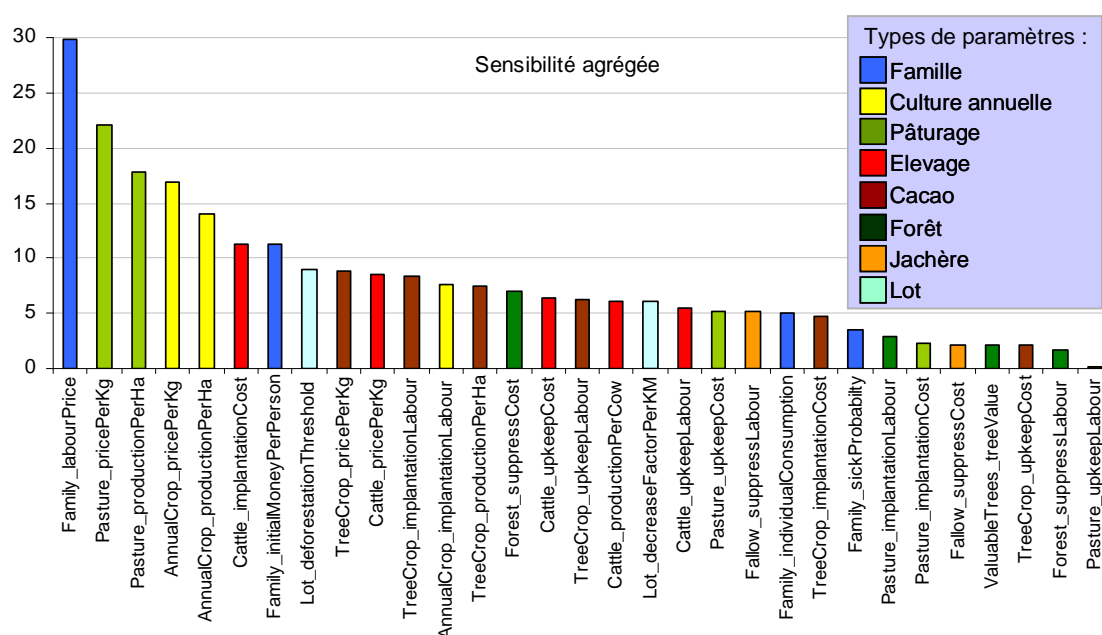


Figure 11-21 : Sensibilité générale agrégeant trois indicateurs du développement durable.

Le tarif de la main d'œuvre ainsi que le prix et la productivité des pâturages sont les paramètres dominants au niveau général. Mais les indicateurs pris indépendamment montrent des sensibilités différentes (les sensibilités de chaque indicateur sont présentées en annexe, fig. 26). Ainsi, le capital de la communauté des agents est sensible au prix de la main d'œuvre et au coût d'implantation du cacao.

Mais cette étude a montré surtout l'influence considérable des conditions initiales. Une première analyse de sensibilité avait été menée sur un état initial prédéterminé spatialement (sols, végétation, lots sont identiques) mais en initialisant les agents aléatoirement (membres et nombre d'inactifs par famille, localisation et stratégie initiale ne sont pas identiques à chaque simulation). Même en répétant 500 fois les simulations par paramètres, les réponses de certains indicateurs (tels que forêt et cacao) étaient trop hétérogènes. A tel point qu'il devenait difficile de discriminer la sensibilité des paramètres. Ainsi, même si les simulations montrent une certaine robustesse du modèle qui laisse apparaître des schémas généraux d'évolution (paysage en arrête de poisson, domination de l'élevage), on constate une sensibilité marquée aux configurations initiales. En effet, pour aider à choisir sa prochaine stratégie, un agent regarde ce qu'ont fait les autres. Or comme il est difficile et long de tirer profit du cacao, les planteurs se font rares en début de simulation. Ceci ne favorise pas une diffusion de ce type de culture. Seules quelques configurations initiales permettent à certains agents de se trouver dans une situation favorable pour devenir planteur. Alors dans ces cas, on constate une meilleure diffusion de cette pratique qui influence fortement le capital et l'environnement.

Si les conditions initiales influencent les résultats, le paramètre *SickProbability* (Probabilité d'être malade pour chaque membre) est aussi la cause d'une grande dispersion des résultats, même si sa sensibilité paraît limitée. Au cours d'une simulation, le seul moment où apparaît de l'aléatoire à lieu pour déterminer le nombre de malades dans les familles (sans ce phénomène, le modèle serait déterministe). La figure suivante montre la signature de ce paramètre :

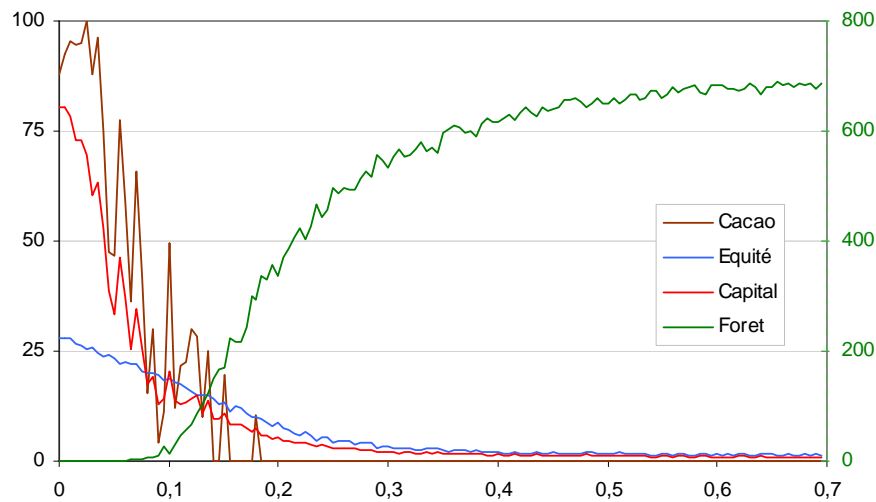


Figure 11-22 : Signatures (moyennées) du paramètre SickProbability pour 4 indicateurs : Equité, Forêt, Capital et Cacao (à noter la forte corrélation entre ces deux derniers). Chaque point représente la valeur moyenne de 10 simulations. Pas d'incrémentation du paramètre : 0,005.

Cette signature montre que plus la probabilité d'être malade est faible, plus le capital global, les surfaces en cacao et l'équité augmentent. A l'opposée, plus la maladie augmente et plus la forêt est préservée, car les producteurs ne travaillent plus. Or cette signature moyennée ne rend pas bien compte de la dispersion des résultats.

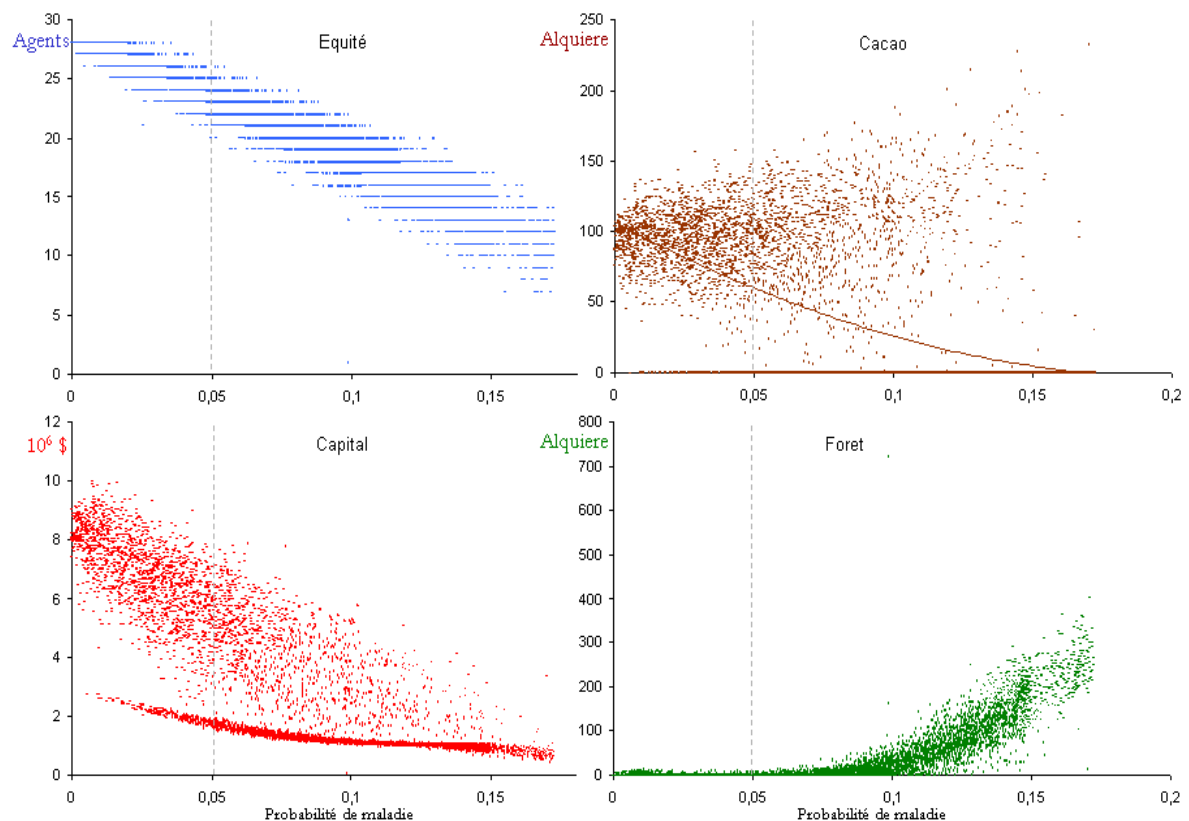


Figure 11-23 : Signatures (brutes) du paramètre SickProbability pour 4 indicateurs. 7000 simulations pour une valeur du paramètre pris aléatoirement entre 0 et 0,17. Une courbe de tendance a été rajoutée pour l'indicateur surface de Cacao.

Autour de la valeur de base (0,05 %) du paramètre, on constate donc une grande dispersion des sorties. Ainsi, même en partant toujours d'un même état initial, le modèle nécessite un grand nombre de répétitions pour pouvoir évaluer la sensibilité de ses paramètres et les hiérarchiser.

11.6.4 Réplication

Personne n'a encore répliqué ce modèle et ce n'est pas aux concepteurs de le faire. Il faut tout de même admettre que ce travail paraît difficile de prime abord car, même si nous avons essayé de rester au plus simple, *TransAmazon* est déjà un modèle compliqué. Sa description complète exige plus de temps et de pages de présentation. Celle qui est fournie ici sert à en comprendre la philosophie générale sans prétendre à la réplication. Pour cela, il faudra plus d'un article et plus que ce chapitre. Une présentation détaillée par des pages web semble être une solution acceptable.

11.7 DISCUSSION

En prenant le parti de se concentrer sur les acteurs, nous cherchons à comprendre les principes de base qui sont à l'origine de la déforestation. Comparer à d'autres approches de type télédétection ou modèles macroscopiques, la modélisation SMA oblige à un contact plus étroit avec le terrain. Cela conduit à prendre en considération les difficultés des acteurs et ainsi à mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre.

Mais le risque de cette approche réside dans la possibilité de se perdre dans la complexité des relations humaines. En travaillant avec deux spécialistes du domaine, la phase de conception a duré un trimestre. On peut penser que ce prologue était excessif, mais sur un sujet si complexe, cette phase était indispensable pour bien définir les objectifs, cerner les limites du modèle et s'accorder sur son contenu. Pour éviter la réalisation d'une usine à gaz et pour toujours garder un contrôle sur l'interprétation des résultats, il a fallu s'accorder sur les éléments à enlever parmi la quantité d'information accumulée sur ce terrain. Le résultat n'est pas un modèle simple, mais sur un tel sujet il était facile de faire bien plus compliqué !

Dans un tel contexte, une démarche *KIDS* aurait utilisé toutes ces informations {chap. 10}. Elle aurait par exemple intégré dans son modèle la typologie de L. Ferreira [2001] sans se poser plus de question. A l'opposé, une approche *KISS* condense les informations en recherchant les mécanismes de base. La force de la simulation multi-agent est alors de retrouver une forme de complexité par le déroulement du temps {chap. 4}.

Néanmoins, ce modèle reste encore un peu descriptif. Non pas que le comportement des agents soit "câblé" (complètement prédéterminé). Mais ils manquent de plus de souplesse, d'une certaine forme d'*autonomie* pour s'adapter à des modifications de leur système. Par exemple, afin de tester les effets d'une politique d'indemnisation à la préservation de la forêt, le modèle, tel que présenté ici, ne permet pas de voir apparaître des modifications de comportements quelle que soit la hauteur de l'indemnisation. Il est pourtant facile d'augmenter le revenu lié à la forêt. Mais les agents n'ont pas d'autres alternatives que de continuer à planter ou élever. Il a donc fallu rajouter artificiellement une nouvelle stratégie : *Conversationniste*. Les activités saisonnières de celle-ci se limitent à implanter une culture annuelle sur une jachère pour l'alimentation de la famille, et à entretenir les cultures déjà en place. On peut alors tester ce type de politique publique en augmentant le revenu issu de la forêt¹³². Les résultats de ces tests sont brièvement présentés en annexe¹³³. Ainsi, l'ajout de la stratégie *Conversationniste* entraîne une nouvelle version du modèle, mais aussi un glissement de ses objectifs : à partir de la question initiale de comprendre "*Comment les producteurs utilisent la terre ?*", nous sommes passés à "*Quelles sont les mesures et les politiques les plus appropriées pour parvenir à des modes de gestion durable ?*". Ce

¹³² Le polymorphisme facilite ces modifications : il s'agit juste de rajouter une nouvelle sous-classe à *Agriculteur*, de spécifier la manière de choisir cette nouvelle stratégie, et de redéfinir la méthode qui donne le revenu de la *Forêt*.

¹³³ Les résultats sont intéressants et contre-intuitifs : ils montrent qu'en termes de déforestation, des indemnités trop faibles ont des conséquences pires que de ne pas indemniser.

déplacement du modèle et de la question de recherche illustre le processus de modélisation présenté sur la figure 10-6 {p. 238, [chap. 10](#)}.

Les changements de stratégie tels qu'ils sont conçus jusqu'à présent, me semblent encore fragiles : les agents prennent leur décision sur la base d'un calcul hasardeux qui intègre les résultats de leurs stratégies antérieures et sur la meilleure stratégie parmi leurs voisins (cf. Figure 11-15). C'est une solution intéressante mais qui ne laisse pas la place à des innovations même si elles sont bien plus avantageuses. Les agents ne possèdent pas la capacité d'anticiper. Par ailleurs, nous avons cherché à mieux prendre en compte les productions futures. En effet, les agents "découvrent" que le cacao produit au bout de 3 ans alors que c'est une évidence pour tous les producteurs. En semant aujourd'hui, on espère en récolter les fruits dans le futur. Cette faculté d'anticipation qui nous est si familière, est difficile à retranscrire chez les agents.

Une autre version a donc été développée qui modifie fortement la manière de changer de stratégie [Bonté, 2007]. L'agent est devenu "anticipatif" : il ne prend plus sa décision sur son bilan passé, mais il explore ses futurs possibles en testant les stratégies à sa disposition. En d'autres termes, il explore un arbre de décisions dont chaque feuille est le résultat d'une succession imaginaire de stratégies. Il choisit alors l'itinéraire qui lui paraît le plus rentable (cf. "simulation dans la simulation" en annexe).

Sur cette base, une nouvelle version est en cours de développement qui cherche à donner plus de souplesse encore dans les possibilités d'adaptation des agents et éviter ainsi des ajouts ad-hoc à chaque nouvelle mesure incitative que l'on voudrait tester. En effet, les stratégies actuelles apparaissent comme des déroulements un peu mécaniques des activités des agents. Elles ne proposent que 2 ou 3 alternatives d'utilisation de la terre. Issues de nombreux entretiens et enquêtes, elles sont cohérentes avec nos observations (voir calendrier des activités en annexe). Néanmoins, elles sont trop rigides pour tester des alternatives d'assolement.

Dans cette nouvelle version, les stratégies préétablies ont donc été supprimées. L'agent connaît maintenant un certain nombre d'activités élémentaires qu'il peut effectuer sur sa terre (défricher, planter et entretenir des cultures, etc.). Il anticipe ses futurs en imaginant diverses combinaisons d'activités. L'arbre de décisions qu'il explore correspondant ainsi à un ensemble d'itinéraires d'assolement¹³⁴. Il choisit alors celui qui lui paraît le plus rentable ou le moins risqué. De cette manière, il construit *dynamiquement* sa stratégie. En basant les choix décisionnels sur la gestion du risque, on espère retrouver les stratégies prédéfinies, mais aussi de nouveaux itinéraires plus efficaces. Avec ce procédé, on aura encore fait un pas vers la généralité.

Dans le même temps, la question de recherche a évolué : le focus se situe désormais sur les difficultés des producteurs. Car il s'avère que les questions du risque et de la sécurité alimentaire sont des problèmes fondamentaux pour les colons¹³⁵.

En conséquence, *TransAmazon* a changé progressivement d'état : de modèle descriptif présentant des comportements stéréotypés pour montrer des scénarios prédéfinis, il devient un modèle plus explicatif pour lequel la gestion du risque prend une dimension jusqu'à lors sous-estimée. A

¹³⁴ Cette version de parcours exploratoires d'arbres de décisions s'apparente davantage à de la recherche opérationnelle. Dans ce cas, il peut s'agir d'aider à trouver des stratégies optimales pour diminuer les risques ou maximiser les profits. Mais ce procédé sera rapidement limité par l'explosion combinatoire. Une solution alternative est décrite dans le paragraphe suivant (Perspectives).

¹³⁵ Un producteur de la Transamazonienne ne pense pas forcément en termes économiques. Certes, il appréhende les variations du cours du cacao. Mais il gère plus son exploitation en fonction de sa main-d'œuvre, de ses besoins, de ses perspectives à court et long termes, des potentialités de ses terres, et surtout des risques. Voilà pourquoi la première activité de l'année est la mise en place de la culture annuelle car elle permet de survivre. Quoi qu'il arrive, la famille aura à manger. Vient ensuite l'élevage qui est une épargne facilement mobilisable, surtout en cas de maladie. Viennent enfin les cultures pérennes qui constituent un investissement avec un retour à moyen et long termes, mais peu flexibles et sensibles aux variations de prix.

présent, il devient un modèle adaptatif susceptible de tester des scénarios. En quelques sortes, il a amélioré sa valeur informative {chap. 1.4.3}. Simultanément, la question de recherche s'est déplacée pour mieux cibler les difficultés des producteurs. Or les façons dont ils y répondent, affectent l'environnement.

11.8 PERSPECTIVES

Outre les évolutions en cours précédemment décrites, nous étudions une autre utilisation de *TransAmazon*. Dans ce cas, l'objectif n'est plus d'étudier un modèle SMA en analysant uniquement ses résultats, mais de participer activement au déroulement de la simulation. Il s'agit donc de concevoir un nouvel outil de simulation participative de type jeu-vidéo avec lequel l'utilisateur joue en agissant directement sur l'évolution de la simulation [Guyot, 2006].

L'objectif de *VisãoFamiliar* (*TransAmazon-Interactif*), est de disposer d'un outil de dialogue permettant de tester, avec les producteurs, des alternatives possibles pour la gestion de leur exploitation. Sur la base de la structure du modèle *TransAmazon*, il s'agit de remplacer les agents et leurs stratégies par des avatars (agents contrôlés par des humains qui les représentent dans le système virtuel). Dans une simulation hybride de ce type, les dynamiques naturelles de croissance végétale, d'appauvrissement des sols ou les précipitations sont prises en charge par le simulateur qui calcule également les conséquences des actions du joueur. Celui-ci dispose d'un ensemble d'activités qu'il peut mobiliser à tout moment pour générer son itinéraire d'assolement mais aussi pour construire d'autres trajectoires familiales. Il peut aussi choisir parmi les indicateurs à disposition, ceux qu'il souhaite suivre au cours du temps. Grâce à la possibilité de "remonter le temps", il peut revenir sur certaines décisions pour tester d'autres alternatives. Car toutes les actions sont enregistrées. On peut donc retourner à n'importe quel moment de la simulation pour expérimenter de nouvelles pistes. Les sauvegardes permettent aussi de comparer des trajectoires et de faire expliciter les raisons des choix décisionnels des participants pour les discuter.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre de projets de développement qui visent la mise en place de systèmes de production et de gestion durable des ressources naturelles et agricoles. En particulier, nous avons testé en grandeur réelle des possibilités de récupération des aires agricoles dégradées. Les résultats sont très enthousiasmants : les fermiers qui se sont prêtés à ces expérimentations, ont vu leur production augmenter alors que dans le même temps, ils n'ont pas déforesté. De plus, ces nouvelles techniques (le semis direct) sont peu coûteuses et offrent un confort de travail très apprécié. Avec *VisãoFamiliar*, nous espérons ainsi contribuer à une diffusion de ces pratiques agricoles. Enfin, une version multi-joueur permettra de faire participer un groupe de producteurs cherchant à s'organiser pour gérer collectivement des aires forestières pour la production durable de bois.

11.9 CONCLUSION

Les différentes versions de *TransAmazon* s'inscrivent donc dans le cadre plus général de projets de développement. Elles ont pour objectif de mieux comprendre les motivations des producteurs sur la manière "traditionnelle" de cultiver leurs terres. Plutôt que de proposer une représentation macroscopique des grandes tendances en cours, il nous a semblé plus important de comprendre ce qui pousse les petits colons des fronts pionniers à produire d'une manière non-durable. Car les mécanismes actuels de production conduisent finalement à la déforestation.

TransAmazon permet donc de décrire ces dynamiques en cours. Il permet aussi d'élaborer des scénarios prospectifs sur les évolutions possibles des fronts pionniers en fonction des nécessités des acteurs. En modifiant légèrement sa structure, on peut alors tester quelques politiques publiques.

Par ailleurs, les différentes versions montrent une évolution des questions de recherche qui ciblent davantage les motivations des producteurs. En partant de raisonnements exclusivement économiques, la question de la gestion du risque s'est progressivement imposée comme un élément essentiel qui motive les activités de production. On a montré en particulier que les risques liés à la production de cacao, pourtant nettement moins nuisible à l'environnement, empêchent les petits colons à s'investir dans cette voie.

En partant d'une représentation plutôt descriptive, le processus de modélisation a conduit à une succession de versions du modèle, qui devient plus explicatif, jusqu'à devenir un modèle adaptatif. Dans le même temps, ce cheminement a permis d'en améliorer la valeur informative.

La prise en considération des difficultés des colons nous amène également à développer un outil original d'accompagnement pour imaginer avec eux des alternatives de production. En testant en parallèle des expérimentations sur le terrain, nous espérons ainsi mettre en place d'autres manières de gérer les lots. Ces alternatives seront, espérons-le, plus durables pour l'environnement mais aussi plus économiquement viables et socialement plus équitables. Déjà les premières solutions envisagées ont montré des résultats enthousiasmants. A tel point que les enfants des producteurs pensent maintenant à rester sur la terre de leurs parents.

BIBLIOGRAPHIE

- [Alcaras & Lacroux, 1994] Alcaras J.-R. et Lacroux F., 1994. Planifier c'est s'adapter. Rapport du CNRS : GRASCE-NR - 94-03, Groupe de recherche sur l'adaptation, la systémique et la complexité économique, Université d'Aix-Marseille 3, France. INIST-CNRS, Cote INIST : DO 3172
- [Allen & G. Ferguson, 1994] Allen J.F. and Ferguson G., 1994. Actions and Events in Interval Temporal Logic, *Journal of Logic and Computation*, Special Issue on Actions and Processes, 1994.
- [Amblard & Dumoulin, 2004] Amblard F. & Dumoulin N., 2004. Mieux prendre en compte le temps dans les simulations individus-centrées. ", in 11èmes Journées de Rochebrune, rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, le Temps dans les systèmes complexes. Rochebrune, France. Janvier 2004. 13-26. Disponible : http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/Labo/MembresEtPagesIntermediaires/pagesperso/membres_actuels/dumoulin/docs/Rochebrune2004.pdf
- [Amblard et al., 2006] Amblard F., Rouchier J., Bommel P., 2006. Evaluation et validation de modèles multi-agents. In : *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Amblard, 2003] Amblard F., 2003. Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées : application à des modèles de dynamiques d'opinions. Doctorat Spécialité Information, Université Blaise Pascal Clermont Ferrand II. 112 p.
- [Amgoud et al., 2002] Amgoud, Parsons et Maudet. 2002. "Stratégical considérations for argumentative agents" Amgoud, N.Maudet. *Proceedings of the 10th International Workshop on Non-Monotonic Reasoning Special session on Argument, Dialogue, Decision*, Toulouse France. p.409-417.
- [Andreae et al., 2004] Andreae M. O., Rosenfeld D., Artaxo P., Costa A. A., Frank G. P., Longo K. M. & Silva-Dias M. A. F., 2004. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science* 27 February 2004: Vol. 303. no. 5662, pp. 1337 – 1342 DOI: 10.1126/science.1092779
- [Angelis et al., 1979] Angelis (De) D.L., Travis C.C., Post W.M., 1979. Persistence and stability of seeddispersed species in a patchy environment. *Journal of Theoretical Population Biology*, 16. pp. 107-125.
- [Antona et al., 2002] Antona, M., Bommel, P., Bousquet, F. & Le Page, C. 2002. Interactions and Organization in Ecosystem Management: the Use of Multi-Agent Systems to Simulate Incentive Environmental Policies. In *Third Workshop on Agent-Based Simulation*, Volume Proceedings Workshop 2002, Passau. ISBN 3-936150-17-6, 188 p. (Ed. C. Urban) : The Society for Modelling and Simulation International. pp. 85-92.
- [Antona et al., 2005] Antona M., Bah A., Le Page C., Mahamane A., Aboubacar I. 2005. Using multi-agent modeling for policy research: The case of fuelwood policy in Niger. In *Conference on Multi-agent modelling for environmental management*, Bourg Saint Maurice - Les Arcs, France, 21-25 mars 2005 / CABM-HEMA, Abstract, 2 p. Colloque CABM-HEMA-SMAGET 2005, 2005-03-21/2005-03-25, Bourg Saint Maurice, France
- [Aquino et al., 2002] Aquino (D') P., Le Page C., Bousquet F., Bah A., 2002. "A novel mediating participatory modelling: the 'self-design' process to accompany collective decision making", *Int.J. Agricultural Resources, Governance and Ecology*, vol.2, n°1, p. 59-74.
- [Aquino et al., 2003] Aquino (D') P., Le Page C., Bousquet F. and Bah A., 2003. Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal. In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 3 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/5.html>>
- [Arnheim, 1969] Arnheim R., 1969. Visual thinking. University of Californio Press. Flammarion pour l'édition française "La pensée visuelle", 1976. 350 p.
- [Ashby, 1956] Ashby, W.R., 1956. An Introduction to Cybernetics, Londres: Chapman and Hall. Traduction française : Introduction à la cybernétique. Dunod. 1958. Une version électronique en anglais est disponible en ligne : <http://pespmc1.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>
- [Atlan, 1986] Atlan H., 1986. À tort et à raison. Intercritique de la science et du mythe, Paris, Seuil.
- [Auger & Poggiale, 1996] Auger P. & Poggiale J.-C., 1996. Emergence of population growth models: fast migrations and slow growth. *Journal of Theoretical Biology*, 182. pp. 99-108.
- [Axelrod & Hammond, 2003] Axelrod, R. and Hammond R.A., 2003. The Evolution of Ethnocentric Behavior. *Midwest Political Science Convention*, Chicago, IL.
- [Axelrod et Hamilton, 1981] Axelrod, R. and Hamilton, W. D. 1981. The evolution of cooperation. - *Science* 211: 1390-1396.
- [Axelrod, 1984] Axelrod R., 1984. The Evolution of cooperation, Basic Books, New York.
- [Axelrod, 1995] Axelrod, R., 1995. The Convergence and Stability of Cultures: Local Convergence and Global Polarization. Santa Fe Institute working paper 95-03-028.

- [Axelrod, 1997] Axelrod R., 1997. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences, R. Conte and R. Hegselmann and P. Terna (eds) *Simulating Social Phenomena*, Springer-Verlag. Selected Papers TBA, Berlin, pp 21-40.
- [Axelrod, 2003] Axelrod R. M., 2003. Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. *Japanese Journal for Management Information System*, Special Issue on Agent-Based Modeling, Vol. 12, No. 3, Dec. 2003.
- [Axtell et al., 1996] Axtell, R., Axelrod R., Epstein J.M. & Cohen M.D., 1996. Aligning Simulation Models: A Case Study and Results. *Computational and Mathematical Organization Theory* 1(2), pp. 123-141.
- [Axtell, 1999] Axtell, R.L. 1999. The Emergence of Firms in a Population of Agents: Local Increasing Returns, Unstable Nash Equilibria, and Power Law Size Distributions. Working paper 03-019-99. Santa Fe Institute: Santa Fe, N.M. Available at www.brook.edu/es/dynamics/papers.
- [Axtell, 2000] Axtell R., 2000. Why Agents ? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences. Working paper n° 17 at Center on Social and Economic Dynamics. November 2000
- [Axtell, 2001] Axtell R.L., 2001. Effect of interaction topology and activation regime in several multi-agent models. In: Moss S and Davidsson P (eds) *Multi-Agent-Based Simulation*. Springer Lecture Notes on Artificial Intelligence vol 1974. Springer-Verlag: NY.
- [Axtell, 2006] Axtell R., 2006. La fin des débuts pour les systèmes multi-agents en sciences sociales. In : *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Bachelard, 1978] Bachelard S., Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles, P. Delattre, M. Thellier, éd., *Élaboration et justification des modèles*. Actes du colloque, ENS, 9-14 oct. 1978. Tome 1, Maloine-Doin, Paris, pp 21-29
- [Balci, 1988] Balci O., 1988. The implementation of four conceptual frameworks for simulation modeling in high-level languages. In, *Proceedings of the 20th conference on Winter simulation*. San Diego, California, United States. pp. 287 - 295
- [Balci, 1998] Balci, O., 1998. Verification, validation, and accreditation. In *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pages 41-4. IEEE Computer Society Press.
- [Banks, 1999] Banks J., 1999. Introduction to simulation. *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation*. Simulation, a bridge to the future - Volume 1 December 1999.
- [Barbault, 1992] Barbault R. 1992. *Ecologie des peuplements. Structure, dynamique et évolution*. Masson, Paris.
- [Barboux, 1990] Barboux C., 1990. *Contrôle par objection d'une théorie incomplète*. Thèse de l'université de Montpellier 2.
- [Bardaji et al., 2002] Bardaji J., Sédillot B. et Walraet E., 2002. "Evaluation de trois réformes du Régime Général d'assurance vieillesse à l'aide du modèle de microsimulation DESTINIE", Document de travail de la DESE, G2002/07, Insee.
- [Barreteau & Bousquet, 1999] Barreteau O. & Bousquet F., 1999. Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. Gleizes M-P and Marcenac P (Eds.) *Ingénierie des systèmes multi-agents*, actes des 7èmes JFIADSM: Hermès : 67-80.
- [Barreteau et al., 2001] Barreteau O., Bousquet F., Attonaty J.M., 2001. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 4, no. 2, <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/5.html>>
- [Barreteau et al., 2003] Barreteau O., Le Page C. and D'Aquino P., 2003. Role-Playing Games, Models and Negotiation Processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 2 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/10.html>
- [Bart, 1995] Bart J., 1995. Acceptance criteria for using individual-based models to make management decisions. In : *Ecological Applications*, pp. 411-420. Ecological Society of America.
- [Berger, 1958] Berger G., 1958. L'attitude prospective. In *Revue Prospective*, n°1, 1958.
- [Bergson, 1907] Bergson H., 1907. *L'évolution créatrice*. Ouvrage originalement publié en 1907. 86e édition. Paris: Les Presses universitaires de France, 1959, 372 pages. Disponible en édition numérique : http://classiques.uqac.ca/classiques/bergson_henri/evolution_creatrice/evolution_creatrice.html
- [Bigbee et al., 2005] Bigbee T., Cioffi-Revilla C. et Luke S., 2005. Replication of Sugascape Using MASON. *Proceedings of the 4th International Workshop on Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems AESCS 2005*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, July 913, 2005.
- [Blanchet et Chanut, 1996] Blanchet D, et Chanut J. M., 1996. Situations individuelles des retraités : un essai de projection par microsimulation, contribution à la journée d'étude Microsimulation du 8 décembre 1996, Paris.
- [Bommel & Lardon, 2000] Bommel P. et Lardon S., 2000. Un simulateur pour explorer les interactions entre dynamiques de végétation et de pâturage. Impact des stratégies sur les configurations spatiales. *Revue Internationale de Géomatique*. Numéro spécial : SIG et simulations. Editions Hermès. pp 107-130.
- [Bommel et al., 2000] Bommel P., Libourel T., Lardon S., 2000. Conception objet dans le cadre des systèmes d'information spatiaux. 12p. *Conférence INFORSID 2000 XVIIIe congrès d'Informatique des Organisations et Systèmes d'Information et de Décision*. pp. 302-313.

- [Bommel, 1996] Bommel P., 1996. Comparaison de deux méthodes d'analyse multifactorielle : Analyse en Composantes Principales (ACP) et Décomposition en Valeurs Singulières (SVD). Mémoire de maîtrise des organismes et des populations, Paris VI. Directeur M. Zimmerman (INRA).
- [Bommel, 1997a] Bommel, P., 1997a. Réflexions sur la validation des modèles: application au projet MOPA (Modélisation de la Pêche Artisanale au Sénégal par un système multi-agents). Rap. bibliogr. DEA, Univ. Lyon I, 01/97, 31p
- [Bommel, 1997b] Bommel, P., 1997b. Recherche d'une méthodologie pour la validation des modèles multi-agents: application à la modélisation de la pêche artisanale au Sénégal (modèle MOPA). Rap. DEA Univ. Lyon I, 07/97, 35p.
- [Bommel, 1999] Bommel P., 1999. Analyse et amélioration d'un modèle multi-agents application à la modélisation des dynamiques sylvo-pastorales (modèle Forpast). Rapport de stage de DESS d'informatique IAO. Université Montpellier II, 1999. 58 p.
- [Bommel & Müller, 2007] Bommel P. et Müller J. P., 2007. An introduction to UML for modeling in the human and social sciences. In, Multi-Agent Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences, Phan D. and Amblard F. (eds.), The Bardwell Press, Oxford
- [Bonabeau & Dessalles, 1997] Bonabeau E. et Dessalles J.L., 1997. Detection and emergence. *Intellectica*, 25. p. 89-94.
- [Bonaudo et al., 2005] Bonaudo T., Bommel P. et Tourrand J.F., 2005. Modelling the Pioneers Fronts of the transamazon highway region. In: SMAGET, Multi-Agent Modelling for Environmental Management. Bourg St Maurice - France. 21- 25 march 2005.
- [Bonaudo, 2005] Bonaudo T., 2005. La gestion environnementale sur un front pionnier amazonien. Thèse de doctorat de l'Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon et Centre de développement durable de l'Université de Brasilia, 370 p
- [Bonté, 2007] Bonté B., 2007. L'anticipation dans les systèmes multi-agents destinés à la modélisation de phénomènes sociaux complexes. Application à la modélisation des fronts pionniers amazoniens. Mémoire de stage de Master II « Intelligence Artificielle et Décision », Université Pierre et Marie Curie Paris 6.
- [Börjeson et al., 2006] Börjeson L.; Höjer, M., Dreborg K.H., Ekvall T. and Finnveden G., 2006. Scenario types and scenario techniques: Towards a user's guide to scenarios. In, *Futures*, 38 (7), September 2006. pp. 723-739.
- [Bousquet et al., 1996] Bousquet F., Barreteau O., Mullon C., Weber J. 1996. Modélisation d'Accompagnement: Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables. In Colloque International "Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie ". Abbaye de Fontevraud 8-11 Septembre 1996.
- [Bousquet et al., 1996] Bousquet, F., Barreteau, O., Mullon, C. et Weber, J. 1996. Modélisation d'accompagnement: systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables. "Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie", Abbaye de Fontevraud, France
- [Bousquet et al., 2001] Bousquet, F., Le Page, C., Bakam, I. et Takforyan, A., 2001. A spatially explicit individual-based model of blue duikers population dynamics: multi-agent simulation of bushmeat hunting in an eastern cameroon village. *Ecological Modelling*, 138(1-3): 331-346
- [Bousquet, 1994] Bousquet F., 1994. Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents, le cas de la pêche dans le delta central du Niger. Doctorat de l'Université Claude Bernard, Lyon 1 - ORSTOM. 175 p.
- [Bousquet, 1995] Bousquet F., 1995. Les systèmes multi-agents et la modélisation de la pêche dans le delta central du Niger : remarques sur une expérimentation. In : Questions sur la dynamique de l'exploitation halieutique, Laloë F., Durand J.L., Rey H (eds), coll. Colloques et séminaires, Orstom ed., pp.141-166.
- [Bousquet, 2001] Bousquet, F., 2001. Modélisation d'accompagnement, Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables. Mémoire pour l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Lyon 1
- [Boussard et al., 2005] Boussard J.M., Gérard F. & Piketty M.G., 2005. Libéraliser l'agriculture mondiale ? Théories, modèles et réalités. Ed. Cirad, Coéd. Cemagref, Ifremer, Inra. Montpellier. 136 p.
- [Boussard et al., 2005] expliquent qu'il est rare que le modèle fonctionne plus d'une dizaine d'année car "au-delà le système d'équations à résoudre n'a plus de solution en raison des difficultés de calcul numérique liées à la trop grande variabilité des prix". De plus, comme expliquer précédemment, le temps est représenté par un artifice qui consiste à considérer qu'un objet identifié à deux moments différents constitue en fait deux objets différents. A chaque année supplémentaire que l'on souhaite simuler, il faut alors rajouter 30.000 équations.
- [Boutillier & Brafman, 2001] Boutillier C. and Brafman R.I., 2001. Partial-Order Planning with Concurrent Interacting Actions, *Journal of Artificial Research* 14, 4-2001.
- [Bradbury, 2002] Bradbury, R.H. 2002. Futures, prediction and other foolishness. In: M. A. Janssen (ed) *Complexity and ecosystem management: The theory and practice of multi-agent systems* (Cheltenham, Edward Elgar) pp 48 - 62
- [Brooks & Connell, 1986] Brooks R. A. & Connell J. H., 1986. Asynchronous distributed control system for a mobile robot. Pages 77-84 of: Wolfe, W. & Marquina, N. (eds), *SPIE's Cambridge Symposium on Optical and Opto-Electronic Engineering*, vol. 727.
- [Brunet, 1990] Brunet R., 1990, *Géographie Universelle*, tome I : Mondes Nouveaux, 1ere partie : Le déchiffrement du monde, Hachette-Reclus, Paris, pp. 9-271

- [Bry, 1995] BRY X. 1995. Analyse factorielle simple. Édition Économica. 1995.
- [Caldas et al., 2002] Caldas M., Walker R., Perz S., 2002. Small Producer Deforestation in the Brazilian Amazon: Integrating Household Structure and Economic Circumstance in Behavioral Explanation. Center for International Development at Harvard University. Working Paper No. 96 October 2002.
- [Calhoun, 1962] Calhoun J. B. 1962. Population Density and Social Pathology. Scientific American, vol. 206, février 1962, p. 139-146.
- [Cariani, 1991] Cariani P., 1991. Emergence and Artificial Life. In: Artificial Life III. Proceedings of the workshop on artificial intelligence 1990, in Santa Fe. Langton G.C., Taylor C., Farmer J.D. and Rasmussen S. Addison Wesley 1991
- [Casti, 1997] Casti, J. L. 1997. Can you trust it ? On the reliability of computer simulation and the validity of models. Complexity. 1997; 8-11.
- [Chalmers, 1982] Chalmers A.F., 1982. Qu'est-ce que la science ? Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend. 2de édition. La Découverte(Ed). p. 287.
- [Charles-Bajard, 2004] Charles-Bajard S., 2004. Les modèles matriciels de type Leslie : Une approche couplée Mathématiques et Statistiques. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 28 avril 2004. Université Claude Bernard - LYON I, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive.
- [Checkland, 1999] Checkland P., 1999. Systems thinking Systems practice. John Wiley & Sons. UK.
- [Coad et al., 1995] Coad P., North D., Mayfield M., 1995. Object Models : Strategies, Patterns & Applications, Yourdan press Computing series 1995.
- [Coad, 1992] Coad P., 1992. Object-Oriented Patterns, Communication of the ACM, pp. 152-159.
- [ComMod, 2005] Collectif ComMod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement, In, Natures Sciences Sociétés 13, 165-168.
- [Conte et Castelfranchi, 1995] Conte, R. and Castelfranchi, C. 1995. Understanding the functions of norms in social groups through simulation. In Gilbert, N. and Conte, R. (Eds.) Artificial Societies - The Computer Simulation of Social Life. London: UCL Press. pp. 74-118.
- [Conte et Paolucci, 2002] Conte, R. and Paolucci, M. 2002. Reputation in Artificial Societies. Social Beliefs for Social Order, Kluwer.
- [Cour des Comptes, 2000] Cour des Comptes, 2000. Rapport sur l'exécution des lois de financement de la sécurité sociale. Septembre 2000
- [Damasio, 1999] Damasio A.R., 1999. Le sentiment même de soi. Corps, émotions, conscience. Ed. Odile Jacob, octobre 1999. Titre original : The feeling of what happens. Body and Emotion in the Making of Consciousness. Harcourt Brace & Cie, New York, 1999.
- [Danchin, 1978] Danchin, A., 1978. Placage et modèles totalitaires, P. Delattre, M. Thellier, éd., Élaboration et justification des modèles. Actes du colloque, ENS, 9-14 oct. 1978. Tome 1, Maloine-Doin, Paris, pp 39-56
- [David et al., 2005] David N., Sichman J. S. é Coelho H., 2005. The Logic of the Method of Agent-Based Simulation in the Social Sciences: Empirical and Intentional Adequacy of Computer Programs. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 8(4) <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/2.html>>.
- [Davidsson, 2002] Davidsson P., 2002. Agent Based Social Simulation: A Computer Science View. Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 5, no. 1. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>
- [Deadman et al., 2001] Deadman P. et al., 2001. Lucita : Multi-Agent Simulations of Land-Use Change near Altamira, Brazil. In: Mc Connell W.J. (Editor), Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. LUCC Report Series, Irvine, California, USA, pp. 57-59.
- [Deffuant et al., 2002] Deffuant G., Amblard F., Weisbuch G. and Faure T., 2002. How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 5, no. 4 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/4/1.html>>
- [Deffuant et al., 2003a] Deffuant G., Weisbuch G., Amblard F. and Faure T. (2003). Simple is beautiful ... and necessary. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 6, no. 1 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/1/6.html>
- [Deffuant et al., 2003b] G. Deffuant, F. Amblard, R. Duboz, E. Ramat. Une démarche expérimentale pour la simulation individuelle centrée. In Actes des 9ièmes Journées de Rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, p45-64. Rochebrune, 26 Janvier, 3 Février 2003.
- [Descombes, 1996] Descombes V., 1996. Les institutions du sens, Les éditions de minuit.
- [Dessalles & Phan, 2005] Dessalles J.L., Phan D. 2005. Emergence in multi-agent systems: cognitive hierarchy, detection, and complexity reduction part I: methodological issues, AE2005 : A Symposium in Agent-based Computational Methods in Finance, Game Theory and their applications, Lille, September 15-16, forthcoming, Mathieu (ed.), Springer

- [Dessalles et al., 2007] Dessalles J.L., Müller J.P. et Phan D., 2007. Emergence in multi-agent systems: conceptual and methodological issues. In, Multi-Agent Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences, Phan D. and Amblard F. (eds.), Bardwell Press, p.93-114, chapter 14.
- [DGPTE, 2004] DGPTE, 2004. " Un outil de prospective des retraites : le modèle de microsimulation Destinie ", Économie et Prévision n°160-161.
- [Di M. Serugendo et al., 2006] Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.P. & Karageorgos A., 2006. Self-Organisation and Emergence in MAS: An Overview. Informatica 30, pp. 45-54.
- [Doniec et al., 2005] Doniec A., Espié S., Mandiau R., et Piechowiak S., 2005. Towards anticipation in traffic simulation at junctions. In Workshop on Driver Behavior in Automotive Environment, Humanist Network, Ispra, Italie.
- [Doniec et al., 2007] Doniec A., Mandiau R., Espié S., Piechowiak S., 2007. Comportements anticipatifs dans les systèmes multi-agents. Application à la simulation de trafic routier. Revue d'Intelligence Artificielle, 21, pp. 183-221.
- [Doran, 1997] Doran, J., 1997. From computer simulation to artificial societies. Transactions of the Society for Computer Simulation International, 14(2). Special Issue : Multi-agent systems and Simulation.
- [Downing et al., 2003] Downing, T.E, Butterfield, R.E., Edmonds, B., Knox, J.W., Moss, S., Piper, B.S. and Weatherhead, E.K. (and the CCDeW project team), 2003. Climate Change and the Demand for Water, Research Report, Stockholm Environment Institute Oxford Office, Oxford. <<http://www.sei.se/oxford/ccdew>>
- [Drogoul et al., 2002] Drogoul A., Vanbergue D., et Meurisse T., 2003. Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents ? Proceedings of MABS'02 (Multi-Agent Based Simulation), Bologna, Italy, July 2002, LNCS, Springer-Verlag.
- [Drogoul et al., 2003] Drogoul A., Vanbergue D., Meurisse T., 2003. Simulation Orientée Agent: où sont les agents ? In 9ièmes Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 2003
- [Drogoul, 1993] Drogoul, A. (1993). De la Simulation Multi-Agent à la Résolution Collective de Problèmes. Thèse de doctorat, Université Paris 6.
- [Duboz, 2004] Duboz R. 2004. Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes. Application à la modélisation multi-échelles en écologie marine. Thèse de Doctorat, Université du Littoral, Côte d'Opale, Calais.
- [Duffy, 2001] Duffy J., 2001. Learning to Speculate: Experiments with Artificial and Real Agents, JEDC, 25, pp 295-319.
- [Edmonds & Hales, 2003] Edmonds B. and Hales D., 2003. Replication, Replication and Replication: Some Hard Lessons from Model Alignment. In: Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 6, no. 4 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/11.html>>
- [Edmonds & Moss, 2004] Edmonds, B. and S. Moss, 2004. From KISS to KIDS - an "anti-simplistic" modelling approach. Joint Workshop on Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, New York City, USA.
- [Edmonds, 2000a] Edmonds B., 2000 The Use of Models - making MABS more informative. In Moss, S. and Davidson, P. (eds.) Multi Agent Based Simulation 2000, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 1979:15-32.
- [Edmonds, 2000b] Edmonds, B. 2000. Complexity and Scientific Modelling. Foundations of Science, 5:379-390. (<http://cfpm.org/cpmrep23.html>)
- [Edmonds, 2002] Edmonds, B. 2002. Simplicity is Not Truth-Indicative. CPM Report 02-00, MMU, 2002 (<http://cfpm.org/cpmrep99.html>).
- [Edmonds, 2005] Edmonds B., 2005. Simulation and Complexity - how they can relate. In Feldmann, V. and Mühlfeld, K. (eds.) Virtual Worlds of Precision - computer-based simulations in the sciences and social sciences. Lit Verlag 5-32.
- [Epstein & Axtell, 1996] Epstein, Joshua M., & Axtell, Robert L. 1996. Growing Artificial Societies. Brookings Institution Press, Washington D.C.
- [Erceau, 1995] Erceau, J., 1995. Complexité et conception des systèmes complexes, vers une ingénierie des systèmes complexes. In actes des journées du cp2i. 13 juin 1995. 21p.
- [Etienne, 2005] Etienne M., 2005. Modélisation d'accompagnement et aménagement forestier. In : Approches participatives de la gestion forestière, Chauvin C. (ed), Cemagref, Paris
- [Ezekiel, 1938] Ezekiel, M., 1938. The cobweb theorem. Quarterly journal of economics, 53 : 225-280.
- [FAO, 2001] FAO 2001. Sociétés Maritimes, Droits et Institutions des Pêches en Méditerranée Occidentale - Revue Synthétique des Droits Collectifs et des Systèmes Décentralisés de Discipline Professionnelle. Document technique sur les pêches No. 420 rédigé par F. Féral.
- [Felix et Xanthoulis, 2005] Felix R. et Xanthoulis D., 2005. Analyse de sensibilité du modèle mathématique "Erosion productivity impact calculator" (EPIC) par l'approche One-Factor-At-A-Time (OAT). In, Biotechnologie, agronomie, société et environnement (Biotechnol. agron. soc. environ.) ISSN 1370-6233. 2005, vol. 9, no3, pp. 179-190

- [Ferber & Müller, 1996] Ferber, Jacques, & Müller, Jean-Pierre. 1996. Influences and Reaction : a Model of Situated Multi-agent Systems. Pages 72-79 of : Tokoro, Mario (ed), Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS-96). The AAAI Press.
- [Ferber et al., 2004] Ferber J., Michel F. and BAEZ J., 2004. AGRE : Integrating Environments with Organizations. LNAI, vol. 3374, Environments for Multi-Agent Systems, First International Workshop, E4MAS 2004, New York, NY, USA, July 19, 2004, Revised Selected Papers. Springer. pp. 48-56
- [Ferber, 1988] Ferber, J. Objets et agents : une étude des structures de représentation et communications en intelligence artificielle, Paris 6, 1988.
- [Ferber, 1994] Ferber J., 1994 - La Kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction. In Revue internationale de systémique, Vol. 8, n°1. pp. 13-27.
- [Ferber, 2006] Ferber, J. 2006. Concepts et méthodologies multi-agents. In : Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Ferreira, 2001] Ferreira L.A., 2001. Le rôle de l'élevage bovin dans la viabilité agro-écologique et socio-économique des systèmes de production agricoles familiaux en Amazonie brésilienne - le cas d'Uruará (Pará, Brésil). Paris, INA-PG: 188.
- [Fianyo et al., 1998] Fianyo, E., Treuil, J., Perrier, E., and Demazeau, Y. (1998). Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes : The representation of time. In Sichman, C. and Gilbert, editors, Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation volume 1534, pages 226 236. Springer-Verlag, Berlin.
- [Fianyo, 2001] Fianyo E., 2001. Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine.
- [Finin et al., 1994] Finin T., Fritzson R., McKay D. and McEntire R., 1994. KQML as an Agent Communication Language. In Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'94), pages 456-463, Gaithersburg, Maryland, 1994. ACM Press.
- [Fishman & Moore, 1985] Fishman G., Moore L., 1985. An Exhaustive Analysis Of Multiplicative Congruential Random Number Generators with Modulus 231-1. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 7(1), 24-45.
- [Fishwick, 1995] Fishwick P., 1995. Simulation Model Design and Execution : Building Digital Worlds. Pearson Education POD
- [Forrest, 1990] Forrest S., 1990. Emergent computation: self-organising, collective, and cooperative phenomena in natural and artificial computing network. Proceedings of the Ninth annual CLNS conference, 1990.
- [Funtowicz & Ravetz. 1991] Funtowicz, S. O., and J. R. Ravetz. 1991. A new scientific methodology for global environmental problems. In Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability, ed. R. Costanza. New York: Columbia Univ. Press.
- [Galan & Izquierdo, 2005] Galan J. M. et Izquierdo L. R., 2005. Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms', Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 8, no. 3 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/2.html>.
- [Galler, 1997] Galler, H.P., 1997. Discrete-time and continuous-time approaches to dynamic microsimulation reconsidered. Online Technical Paper - TP13. October 1997, NATSEM, University of Canberra
- [Gause, 1934] Gause G. F., 1934. The struggle for existence. Williams and Wilkins, Baltimore.
- [Gause, 1935] Gause G. F., 1935. Vérifications expérimentales de la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Actual. Sci. Industr., 277.
- [Gayon, 2002] Gayon J., 2002. Evolution culturelle : le spectre des possibles. Gènes et culture, colloque au Collège de France, octobre 2002.
- [Gell-Mann 1995] Gell-Mann Murray. 1995. Le Quark et le Jaguar : Voyage au cœur du simple et du complexe. Albin Michel. 443p.
- [Genesereth & Nilsson, 1987] Genesereth, M. R., & Nilsson, Nils J., 1987. Logical foundations of artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [Gilbert, 1995] Gilbert, N. 1995. Emergence in social simulation. Artificial societies. The computer simulation of social life. R. c. a. N. Gilbert, UCL Press: 144-156.
- [Gilbert, 1998] Gilbert, N. 1998. The simulation of social processes. Edited transcript of a talk given at the SMAGET Conference, 6-8 October 1998, Clermont-Ferrand, France.
- [Gilly, 1989] Gilly B, 1989. Les modèles bio-économiques en halieutique : démarches et limites. In: Verdeaux, François (ed.) - La pêche : enjeux de développement et objet de recherche, Cahiers Sciences Humaines, vol.25, n°1-2, p. 23-33.
- [Ginot et al., 2006] Ginot V., Gaba, S., Beaudouin, R., Aries, F. et Monod, H., 2006. Combined use of local and ANOVA-based global sensitivity analyses for the investigation of a stochastic dynamic model: Application to the case study of an individual-based model of a fish population. Ecological Modelling, Vol. 193, Issue: 3-4, March 15, 2006. pp. 479-491

- [Ginot et Monod, 2006] Ginot V. et Monod H., 2006. Explorer des modèles par simulation : application aux analyses de sensibilités. In, *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Ginot, 2003] Ginot V., 2003. Exploration numérique des propriétés d'un modèle : analyse par simulation de la réponse aux paramètres. In, *10èmes journées de Rochebrune : Le statut épistémologique de la simulation*. Rochebrune, 26 janvier - 3 février 2003. Télécom Paris publ., ENST 2003 S 001.
- [Godard & Legay, 1992] Godard O. & Legay J.M., 1992. Modélisation et simulation : une approche de la prédictivité. In M. Jollivet (ed), *Les passeurs de frontière*, Paris. 589p.
- [Godet, 1991] Godet M., 1991. De l'anticipation à l'action. Paris : Dunod, 1991
- [Goldratt et Cox, 1993] Goldratt E. M. et Cox J., 1993. Le but. Un processus de progrès permanent. AFNOR.
- [Goreaud, 2000] Goreaud, F., 2000. Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. Thèse Sciences forestières, Laboratoire de Recherche en Sciences Forestières, Eaux et Forêt, ENGREF
- [Gouaïch & Guiraud, 2002] Gouaïch, A., & Guiraud, Y. 2002. {Movement, Interaction, Calculus}* : an algebraic environment for distributed and mobile calculus. In : *Proceedings of the First International NAISO Congress on Autonomous Intelligent Systems (ICAIS 2002)*. NAISO Academic Press, Canada/The Netherlands.
- [Gouaïch, 2003] Gouaïch, A., 2003. Requirements for achieving software agents autonomy and defining their responsibility. In : *The First International Workshop on Computational autonomy - Potential, Risks, Solutions (autonomy 2003)*.
- [Gouaïch, 2005] Gouaïch, A. 2005. Movement, Interaction, Calculation as Primitives for Everywhere & Anytime Computing. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.
- [Grassé, 1959] Grassé P., 1959. La reconstruction du nid et les interactions inter-individuelles chez les bellicositermes natalenis et cubitermes sp. La théorie de la stigmergie: essai d'interprétation des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6:41-83.
- [Griffiths et al., 2002] Griffiths, N. Luck M. and d'Iverno M., 2002. Cooperative Plan Annotation through Trust, Workshop Notes of UKMAS'02, Eds. P. McBurney, M. Wooldridge, UK Workshop on Multi-agent Systems, Liverpool, 2002.
- [Grimm & Railsback, 2005] Grimm V, Railsback SF. 2005. Individual-based Modeling and Ecology. Princeton University Press, Princeton N.J., 428 pp.
- [Grimm et al., 2006a] Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, Goss-Custard J, Grand T, Heinz S, Huse G, Huth A, Jepsen JU, Jørgensen C, Mooij WM, Müller B, Pe'er G, Piu C, Railsback SF, Robbins AM, Robbins MM, Rossmanith E, Rüger N, Strand E, Souissi S, Stillman RA, Vabø R, Visser U, DeAngelis DL., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198:115-126.
- [Grimm et al., 2006b] Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, Goss-Custard J, Grand T, Heinz S, Huse G, Huth A, Jepsen JU, Jørgensen C, Mooij WM, Müller B, Pe'er G, Piu C, Railsback SF, Robbins AM, Robbins MM, Rossmanith E, Rüger N, Strand E, Souissi S, Stillman RA, Vabø R, Visser U, DeAngelis DL., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Online Appendix. pp. 159. <doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>
- [Grimm, 1999] Grimm V. 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned, and what could we learn in the future? *Ecological Modelling* 115:129-148.
- [Guessoum, 1996] Guessoum Z., 1996. Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents. Thèse de l'Université Paris 6, LAFORIA, mai 1996.
- [Gutknecht, 2001] Gutknecht O., 2001. Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents. Examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques. Thèse de l'Université Montpellier II, LIRMM, soutenue le 14 septembre 2001
- [Guyot, 2006] Guyot P., 2006. Simulations multi-agents participatives. Faire interagir agents et humains pour modéliser, explorer et reproduire les comportements collectifs. Thèse de doctorat en informatique de l'Université de Paris 6. 27 juin 2006.
- [Hagget, 1973] Hagget P., 1973. L'analyse spatiale en géographie humaine, Paris, Armand Colin, 390 p.
- [Hales et al., 2003] Hales D., Rouchier J. and Edmonds B., 2003. Model-to-Model Analysis. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/5.html>
- [Hall, 1971] Hall E.T., 1971. La dimension cachée. Editions du seuil. Edition originale "The hidden dimension" 1966 - Doubleday & Co New York.
- [Hardin, 1960] Hardin G., 1960. The competitive exclusion principle. *Science*, 131, 1291-1297.
- [Hardin, 1968] Hardin G. 1968. The tragedy of the commons. *Science* 162 : 1243-1248
- [Hayek, 1966] Hayek F.A., 1966. Lecture on a master mind : Dr Bernard Mandeville. *Proceedings of the British Academy*, vol 52, 1966 ; repris dans *New Studies in Philosophy, Politics, Economics, and the History of Ideas*, Londres et Chicago, 1978.

- [Hewitt, 1977] Hewitt, C., 1977. Viewing Control Structures as Patterns of Message Passing. *Artificial Intelligence*, vol. 8, (n°3), p.323-374, 1977.
- [Hill, 1993] Hill D., 1993. *Analyse Orientée-Objet et modélisation par simulation*. Addison-Wesley.
- [Huberman, & Glance, 1993] Huberman B. A. & Glance N., 1993. Evolutionary games and computer simulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 90:7716{7718, Aug. 1993.
- [INSEE 1999] INSEE 1999. Documents de travail du Département des études économiques de l'Insee : Le modèle de microsimulation dynamique Destinée.
- [Israel, 1996] Israel G., 1996. *La mathématisation du réel*. Seuil, Paris, France.
- [Jolicoeur, 2002] Jolicoeur 2002. Screening designs sensitivity of a nitrate leaching model (ANIMO) using a one-at-a-time method. USA: State University of New York at Binghamton, 14 p.
- [Jouvenel, 1999] Jouvenel (De) H., 1999. La démarche prospective : un bref guide méthodologique. *Revue Futuribles* n°247, novembre 1999
- [Kahn & Wiener, 1967] Kahn H., and A. Wiener 1967. *The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years*, Macmillan, New York
- [Kaimowitz & Angelsen, 1998] Kaimowitz D. and Angelsen A., 1998. Economic models of tropical deforestation. a review. *Revue du CIFOR*, Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia. pp. 153.
- [Kaimowitz et al., 2004] Kaimowitz D., Mertens B., Wunder S. and Pacheco P., 2004. Hamburger Connection Fuels Amazon Destruction. Cattle ranching and deforestation in Brazil's Amazon. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia.
- [Kiyotaki-Wright, 1989] Kiyotaki N. and Wright R., 1989. On money as a medium of exchange, *Journal of Political Economy*, 97, pp 924-954.
- [Labiouse, 1998] Labiouse C., 1998. L'évolution de la coopération. Modélisation par le Dilemme du Prisonnier Itératif. Mémoire de 2ème licence en sciences psychologiques. Université de Liège.
- [Lambin, 1994] Lambin, E.F. 1994 Modeling deforestation processes, a review. *Trees, tropical ecosystem environment observation by satellites*. Research Report No. 1, European Commission Joint Research Center/European Space Agency, Brussels.
- [Lambin & Geist, 2006] Lambin E. & Geist H., 2006. Land-Use and Land-Cover Change - Local Processes and Global Impacts. Series: Global Change - The IGBP Series. Lambin, Eric F.; Geist, Helmut J. (Eds.) 2006, XVIII, 222 p., 44 illus., 19 in colour, Hardcover. ISBN: 978-3-540-32201-6
- [Langton, 1990] Langton C.G. 1990. Computation at the edge of chaos. *Physica D*, 42, 1990
- [Lardon et al., 1998] Lardon S., Baron C., Bommel P., Bousquet F., Le Page C., Lifran R., Monestiez P., Reitz P. 1998. Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage. In actes du colloque SMAGET, Clermont-Ferrand du 05 au 08/10/98. 14 p.
- [Lardon et al., 2000] Lardon S., Lifran R., Osty P.-L., Bommel P., Libourel T., Bousquet F., Le Page C. 2000. De la simulation d'une dynamique d'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace pastoral. Un modèle de conception des transformations de l'espace. JFIADSMA'2000, 8° Journées Francophones d'intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents. 2-4 octobre 2000.
- [Larkin et Simon, 1987] Larkin J.H., Simon H.A., 1987. Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words, *Cognitive Science*, Vol. 11, 1997 (p. 65-99).
- [Laurance et al., 2001] Laurance W. F., Cochrane M. A., Bergen S., Fearnside P., Delamonica P., Barber C., Angelo S., Fernandes T., 2001. The future of the Brazilian Amazon. *Science*, n° 291 pp 438-439
- [Lawson et Park, 2000] Lawson Barry G., Park Steve. 2000. Asynchronous Time Evolution in an Artificial Society Mode. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 3, no. 1. <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/1/2.html>
- [Le Bras, 1996] Le Bras H., 1996. *Les Limites de la planète : mythes de la nature et de la population*. Flammarion, 1996
- [Le Fur et al., 1999] Le Fur, J., Cury, P., Laloë, F., Durand, M.H. et Chaboud C., 1999. Co-viabilité des systèmes halieutiques. *Nature, Sciences, Sociétés*, vol.7, no2, pp.19-32.
- [Le Fur, 1990] Le Fur J., 1990. *Projet MOPA : Modélisation de la pêche artisanale au Sénégal*. Document multig. ORSTOM. 27p.
- [Le Fur, 1994] Le Fur J., 1994. Dynamique du système Pêche artisanale et intelligence artificielle : Le Projet MOPA. In : *L'évaluation des ressources exploitables par la pêche artisanale sénégalaise*. Barry-Gerard, Diouf, Fonteneau eds, Orstom, coll. Colloques et séminaires. t.2. pp.405-417.
- [Le Fur, 1995] Le Fur J., 1995. Apports et difficultés d'une modélisation systémique des exploitations halieutiques. In : *Les recherches françaises en évaluation quantitative et modélisation des ressources et des systèmes halieutiques*. Gascuel D., Durand J.L. et Fonteneau A. eds, Orstom, coll. Colloques et séminaires. pp.375-405.

- [Le Fur, 1996] Le Fur, J., 1996. Simulating a fishery exploitation: Application to the small-scale fishery in Senegal. In: IIFET'96, proc. Sym. Marrakech, Morocco, jul.1996, 15p.
- [Le Fur, 1997] Le Fur J., 1997. Modeling fishery activity facing change : Application to the Senegalese artisanal exploitation system. In : Global vs local changes, Cury P., Durand M.H., Mendelsson R. and Roy C., eds. (in press).
- [Le Fur, 2000] Le Fur, J., 2000. Modélisation de décisions individuelles dans une exploitation halieutique. In Gillon, Y., Chaboud, C., Boutrais, J. et C.Mullon (eds.) Du bon usage des ressources renouvelables. IRD Ed., coll. latitudes 23, pp.345-358.
- [Le Fur, 2005] Le Fur, J., 2005. Approches de la validation des modèles de système complexe : exemples issus de simulations multi-agents de secteurs halieutiques. Atelier Modélisation Environnement; Apports de la modélisation à la gestion des ressources naturelles. session 19 "Validation" du 03/03/2005
- [Le Moigne, 1977] Le Moigne J. L., 1977. La théorie du système général - Théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, 1977.
- [Le Moigne, 1990] Le Moigne J.L., 1990. La modélisation des systèmes complexes. AFCET Systèmes, Dunod, Paris. p. 179.
- [Le Page et al., 1999] Le Page C., Lardon S., Bommel P., Baron C., Bah A., Bakam I., Bousquet F., 1999. Entités spatiales génériques et modèles de simulation multi-agent. JFIADSMA'99, 7^e Journées Francophones d'intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents. 8-10 novembre 1999.
- [Le Page et Bommel, 2004] Le Page C. et Bommel P., 2004. A methodology to perform agent-based simulations of common-pool resources management. From a conceptual model designed with UML to its implementation within CORMAS. Book chapter in Companion Modeling, Role-Playing Games and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Southeast Asia. F. Bousquet, G. Trebil & B. Hardy (eds.).
- [Le Treut, 1997] Le Treut H., 1997. Climat : pourquoi les modèles n'ont pas tort : Objet de critiques récurrentes, la modélisation est le pivot de la climatologie. In : La recherche n°298. Mai 1997. Pp. 68-73.
- [Lebreton, 1996] Lebreton J.D., 1996. Demographic models for subdivided populations: the renewal equation approach. Journal of Theoretical Population Biology, 49, 3. pp. 291-313.
- [Lecointre, 2004] Lecointre G., 2004. Evolution et créationnismes, Dossier "Evolution" de Sagascience, CNRS. Qu'appelle-t-on évolution ? <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/articles/chap1/lecointre1.html>
- [Leslie, 1945] Leslie P.H., 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika, 33 : 183-212.
- [Letellier, 2005] Letellier B. 2005. Saisir la pensée diagrammatique, lectures plurielles. Acta Fabula, Été 2005 (Volume 6 numéro 2), URL : <http://www.fabula.org/revue/document962.php>
- [Lett, 1999] Lett C., 1999. Modélisation et simulation de la dynamique des écosystèmes forestiers : des modèles agrégés aux modèles individuels spatialisés. Thèse de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg.
- [Lévy, 1994] Lévy P., 1994. L'intelligence collective - Pour une anthropologie du cyberspace. La Découverte, Paris, 1994
- [Lewin, 1994] Lewin, R., 1994. La Complexité : une théorie de la vie au bord du chaos. InterEditions, Paris.
- [Lewis, 1993] Lewis R.O., 1993. Verification, validation, and accreditation (VV&A) of models and simulations used in distributed interactive environments. In : Modelling and simulation. Proceedings of the 1993 European Simulation multiconference. Alain Pavé (Ed.).
- [Libourel, 2003] Libourel T. 2003. Autour de la Conception de Systèmes Complexes. Modélisation, Evolution, Infrastructures. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Montpellier II, Département Informatique. 03/01/2003
- [Lions, 2003] Lions P.-L., 2003. Equations aux dérivées partielles et applications. Leçon inaugurale du collège de France. Fayard, 2006 - ISBN 2-213-61719-8
- [Livet, 2006] Livet P., 2006. Essai d'épistémologie de la simulation multi-agent en sciences sociales. In : Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Lobry et Elmoznino, 2000] Lobry C, Elmoznino H. 2000, Combinatorial Properties of Some Cellular Automata Related to the Mosaic Cycle Concept, Acta Biotheoretica, Volume 48, Issue 3 - 4, Dec 2000, Pages 219 - 242.
- [Lobry, 2007] Lobry J.R., 2007. Ajustement au modèle de Lotka-Volterra. Fiche TD avec le logiciel. <http://pbil.univ-lyon1.fr/R/fichestd/tdr4a.pdf>
- [Magnin, 1996] Magnin L. 1996 Modélisation et simulation de l'environnement dans les systèmes multi-agents : application aux robots footballeurs. Thèse de doctorat. Université Paris VI
- [Malhi et al., 2008] Malhi Y., Timmons J.R., Betts R.A., Killeen T.J., Li W., Nobre C.A., 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. Science 11 January 2008: Vol. 319. no. 5860, pp. 169 – 172 DOI: 10.1126/science.1146961. Antérieurement publié dans Science Express le 29 Novembre 2007

- [Manson, 2002] Manson S.M., 2002 Validation and verification of multi-agent systems. In: M. A. Janssen (ed) Complexity and ecosystem management: The theory and practice of multi-agent systems (Cheltenham, Edward Elgar) pp 63 - 74
- [Mathieu et al., 2003] Mathieu P., Routier J.C., Secq Y., 2003. RIO : Roles, Interactions et Organisations. In: Proceedings of the Secondes Journées Francophones des modèles formels de l'interaction. 20-22 mai 2003, Lille
- [Matsumoto & Nishimura, 1998] Matsumoto, Makato, & Nishimura, Takuji. 1998. Mersenne Twister : A 623-dimensionnaly equidistributed uniform pseudorandom number generator. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations Special Issue on Uniform Random Number Generation, 8(1), 3-30.
- [Maturana & Varela, 1979] Maturana H. et Varela F., 1979. Autopoiesis and Cognition : The Realization of the Living, Boston, Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 42, Reidel, 1979.
- [Maturana & Varela, 1994] Maturana H. et Varela F., 1994. L'arbre de la connaissance, Addison-Wesley France, Paris.
- [McLeod, 1986] McLeod, J. 1986. Computer modeling and simulation : The changing challenge". Simulation, march 1986, 114-118
- [McCarthy et al. 1994] McCarthy et al. OIKOS 102: 124-136, 2003. Modelling the role of social behavior in the persistence of the alpine marmot *Marmota marmota*. Volker Grimm, Norbert Dorndorf, Fredy Frey-Roos, Christian Wissel, Tomasz Wyszomirski and Walter Arnold
- [McCullagh et Nelder, 1989] McCullagh P. and Nelder J.A., "Generalized Linear Models". Chapman & Hall. University Press, Cambridge. 1989.
- [McCullough & Vinod, 1999] McCullough B. & Vinod D., 1999. The numerical reliability of econometric software. Journal of Economic Literature 37 (2) pp. 633-665.
- [Meadows et al., 1972] Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J. and Behrens, W. W., 1972. The Limits to Growth. New York: Universe Books. ISBN 0-87663-165-0
- [Meurisse, 2003] Meurisse T., 2003. L'importance des modèles dans la conception de simulations. in Actes des 10èmes journées de Rochebrune : Le status épistémologique de la simulation. Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, Megève, France, janvier 2003..
- [Meurisse, 2004] Meurisse, T. 2004. Simulation multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation. Thèse de Doctorat, Université de Paris 6: 142.
- [Michel et al., 2001] Michel F., Gutknecht O., Ferber J. 2001. Generic simulation Tools based on MAS organization. The 10th European Workshop on Multi-Agent Systems, MAAMAW'2001 Annecy, May 2001.
- [Michel et al., 2002]. Michel F., Bommel P., Ferber J. 2002. Simulation interactive distribuée de SMA par des SMA. Colloque JFIADMSA, Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents. 28 au 30 octobre 2002.
- [Michel et al., 2003] Michel F., Gouaïch, A. & Ferber J., 2003. Weak Interaction and Strong Interaction in Agent Based Simulations. Pages 43-56 of : Hales, David, Edmonds, Bruce, Norling, Emma, & Rouchier, Juliette (eds), Multi-Agent-Based Simulation III, Proceedings of MABS 2003, Fourth International Workshop, vol. LNAI 2927. Lecture Note in Artificial Intelligence, Springer-Verlag.
- [Michel, 2004] Michel F., 2004. Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents. Thèse de l'université de Montpellier II, sciences et techniques du Languedoc.
- [Michelin & Poix, 1998] Michelin Y., Poix C., 1998. Simulation of land use evolution by discrete events method: application to "la chaîne des Puys" from XVth to XVIIIth century. Discrete dynamics in nature and society, 2, 173-186.
- [Millischer, 2000] Millischer L., 2000. Modélisation individu centrée des comportements de recherche des navires de pêche. Approche générique spatialement explicite par systèmes multi-agents. Intérêts pour l'analyse des stratégies et des puissances de pêche. Thèse de Doctorat Halieutique, Ensa-Rennes Organisme d'accueil : Département Halieutique, Ensa-Rennes
- [Minsky, 1965] Minsky M., 1965. Matter, Mind and Models. Proceedings of IFIP Congress, p. 45-49.
- [Minsky, 1988] Marvin Minsky, 1988. La Société de l'Esprit. Traduction de : The Society of Mind, Simon & Schuster, 1987 ; InterEditions 1988
- [Morales et al., 2005] Morales Grosskopf H., Bommel P. Tourrand J. F., 2005. Modelling Livestock Farmers' Strategies in the Uruguayan Pampa. In: Zerger, A. and Argent, R.M. (eds) MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2005, pp. 2340-2345. ISBN: 0-9758400-2-9. http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/morales_grosskopf.pdf
- [Morand, 1998] Morand B., 1998. Modeling: Is it Turning Informal into Formal ? International Workshop Communication: UML'98 Beyond the Notation, June 3rd - 4th 1998. Mulhouse, France. Lecture Notes on Computer Science n°1618, J.-P. Bezivin & J.-P. Muller (eds), Springer-Verlag.
- [Morand, 2000] Morand B., 2000. Le diagramme : à la périphérie ou au cœur de la cognition ? In: Communication aux Rencontres interdisciplinaires sur les représentations graphiques dans les systèmes complexes naturels et artificiels, 30/01 - 4/02/2000, 9èmes Journées de Rochebrune.

- [Morel, 1978] Morel, F. 1978. Un point de vue de physiologiste expérimentateur sur les modèles. P. Delattre, M. Thellier, éd., *Élaboration et justification des modèles. Actes du colloque, ENS, 9-14 oct. 1978. Tome 1, Maloine-Doin, Paris, pp 31-37*
- [Morin, 1977] Morin E., 1977. *La Méthode. Tome 1, La Nature de la nature. Le Seuil, Nouvelle édition, coll. Points, 1981*
- [Morin, 1990] Morin E., *Introduction à la pensée complexe. Réimpr., avril 2005. Seuil, Collection Points Essais. Paris. 158 p.*
- [Müller, 2002] Müller, J.P., 2002. Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes. Mémoire pour l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Montpellier II.
- [Müller, 2004] Müller J.P., 2004. Emergence of Collective Behaviour and Problem Solving. *Engineering Societies in the Agents World - 4th International Workshop (ESAW 2003)*, A. Omicini, P. Petta, and J. Pitt (Eds), *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 3071, pp. 1-20. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [Muzy et al., 2005] Muzy A., Innocenti E., Wainer G., Aiello A. et Santucci J. F., 2005. Specification of discrete event models for fire spreading. *Simulation: transactions of the society of modeling and simulation international, SCS, 81, 103-117.*
- [Muzy, 2001] Muzy A. 2001. *Modélisation et simulation Orientées Objet de la propagation des feux de forêt. Mémoire de DEA, laboratoire SPE, de l'université de Corse. Juin 2001.*
- [Nadeau 1999] Nadeau R., 1999. *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie*, PUF, Paris.
- [NAT, 1999] National Research Council, 1999. *Sharing the fish: toward a national policy on individual fishing quotas. National Research Council; (ed). National Academy Press USA., July 1999.*
- [Negreiros Alves, 2004] Negreiros Alves A.M., 2004. *Dynamique et reproduction sociale de l'agriculture familiale des fronts pionniers d'Amazonie brésilienne. Exemple du paysannat de la Transamazonienne associant élevage laitier et agriculture. EHESS, DEA en Recherches Comparatives sur le Développement, 25 octobre 2004.*
- [Nepstad et al., 2002] Nepstad D., Mc. Grath D., Alencar A., Barros A. C., Carvalho G., Santilli M., del C. Vera Diaz M., 2002. *Frontier Governance in Amazonia. Science 295: 629-631.*
- [Odum, 1971] Odum E.P., 1971. *Fundamentals of Ecology. 3rd edition. Saunders, West Washington Square, Philadelphia, Pa, USA, 1971.*
- [OMG, 1997] UML Summary, version 1.1, (1/09/1997). <http://www.rational.com/uml>
- [OMG, 2003] OMG. 2003. *OMG Specification of Unified Modeling Language. Version 1.5, document Number: formal/03-03-01. Object Management Group (OMG). March 2003.*
- [Oreskes et al., 1994] Oreskes N., Shrader-Frechette K., & Belitz K., 1994. Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science 4 February 1994: Vol. 263. no. 5147, pp. 641 - 646*
- [Orléan, 2004] Orléan A., 2004. What is a Collective Belief. In, Bourguine P., Nadal J.-P. (eds.), *Cognitive Economics, An Interdisciplinary Approach*, Springer, p.199-212, 2004.
- [Parker et al., 2003] Parker, D. C., Manson S. M., Janssen M. A., Hoffmann M. J., and Deadman P., 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. Pages 314-337. *Annals of the Association of American Geographers.*
- [Parunak et al., 1998] Parunak, H.V.D., Savit, R. and Riolo, R.L., 1998. Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide. In Sichman, J.S., Conte, R., and Gilbert, N. (Eds.), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, Springer Verlag.
- [Parunak et al., 2003] Parunak, H. Van Dyke, Breuckner, S., Fleischer, M., et Odell, J., 2003. A Design Taxonomy of Multi-Agent Interactions. Pages 123-137 of : Paolo Giorgini, Jörg P. Müller, James Odell (ed), *Agent-Oriented Software Engineering IV : 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003, Revised Papers. Lecture notes in computer science LNCS, vol. 2935. Springer.*
- [Pavé, 1994] Pavé A., 1994. *Modélisation en biologie et en écologie. Aléas (Ed).*
- [Pepper et Smuts, 2000] Pepper, J.W. and B.B. Smuts. 2000. "The evolution of cooperation in an ecological context: an agent-based model". Pp. 45-76 in T.A. Kohler and G.J. Gummerman, eds. *Dynamics of human and primate societies: agent-based modeling of social and spatial processes. Oxford University Press, Oxford.*
- [Pepper et Smuts, 2002] Pepper J.W. and Smuts B.B., 2002. Assortment through Environmental Feedback. *American Naturalist, 160: 205-213*
- [Pesty et al., 1997] Pesty S., Batard E., Brassac C., Delépine D., Gleizes M.P., Glize P., Labbani O., Lenay C., Marcenac P., Magnin L., Müller J.P., Quinqueton J. et Vidal P., Groupe de travail "Collectif" IAD/SMA de AFCET/AFIA, 1997. *Emergence et SMA, In Joël Quinqueton, Marie-Claude Thomas et Brigitte Trousse (éds), IA distribuée et systèmes multi-agents, JFIADSMA'97, 2-4 avril 1994. Paris : Hermès, 323-341.*
- [Phan, 2007] Phan D., 2007. Introduction - Modélisation et simulation multi-agents en économie et sciences sociales comme compléments des formalismes classiques dans une approche par abstraction décroissante. In, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9. pp. 255-262

- [Piaget, 1968] Piaget J., 1968. Le structuralisme. PUF Ed. 127 p.
- [Pimentel et al., 1965] Pimentel D., Feinberg E.H., Wood P.W., et Hayes J.T., 1965. Selection, spatial distribution, and the coexistence of competing fly species. *Am. Nat.*, 99. 141-167.
- [Piketty, 2003] Piketty M.G., 2003. Projeto Fapesp : Mudanças do uso da terra e da floresta e efeito estufa nas frentes pioneiras da Amazônia brasileira. *Projet Cirad : Développement régional et déforestation. Quelles alternatives durables pour l'Amazonie ?* Sao-Paulo, Cirad-Amis, 46 p.
- [Poccard-Chapuis, 2004] Poccard-Chapuis R., 2004. Les réseaux de la conquête. Filière bovine et structuration de l'espace sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale brésilienne. Thèse de doctorat en Géographie, Université de Paris X.
- [Poccard et al. 2005] Poccard-Chapuis R., Thales M., Venturieri A., Piketty M.G., Mertens B., Bastos da Veiga J. et Tourrand J.F., 2005. La filière viande : un levier pour contrôler les dynamiques pionnières en Amazonie brésilienne ? *Cahiers Agricultures* vol. 14, n° 1, janvier 2005
- [Poggiale & Auger, 2004] Poggiale J.-C. & Auger P., 2004. Impact of spatial heterogeneity on a predator-prey system dynamics, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Biologies*. 327, pp. 1058-1063, 2004.
- [Polhill et al., 2005] Polhill J. Gary, Izquierdo Luis R. and Gotts Nicholas M., 2005. The Ghost in the Model (and Other Effects of Floating Point Arithmetic). In, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 8, no. 1. <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/1/5.html>>
- [Polhill et al., 2008] Polhill J.G., Parker D., Brown D. and Grimm V., 2008. Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 11, no. 2 3. <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/3.html>>
- [Popper, 1973] Popper K.R., 1973. La logique de la découverte scientifique, Payot, Paris, traduction de l'édition de 1968. Edition originale 1935.
- [Popper, 1985] Popper K. R., 1985. conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique". Payot (1st ed. in 1969). p. 342.
- [Press et al., 1986] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., 1986. Numerical Recipes. Cambridge University Press 1986, pp. 191-199.
- [Ramade, 1995] Ramade F., 1995. Eléments d'écologie - Ecologie appliquée. Ediscience International, Paris McGraw Hill (5e éd.).
- [Ramat, 2006] Ramat, E. 2006. Introduction à la modélisation et à la simulation à événements discrets. In : *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Rand & Wilensky, 2006] Rand W. and Wilensky U., 2006. Verification and Validation through Replication: A Case Study Using Axelrod and Hammond's Ethnocentrism Model. *Proceedings of NAACSOS 2006*.
- [Reitz, 1992] Reitz P., 1992. Contribution à l'étude des environnements d'apprentissage. Conceptualisation, spécifications et prototype. Thèse de l'université de Montpellier 2.
- [Resnick, 1990] Resnick M. 1990. MultiLogo : A Study of Children and Concurrent Programming. *Interactive Learning Environments*, 1(3).
- [Resnick, 1994] Resnick M., 1994. Turtles, termites, and traffic jams : explorations in massively parallel microworlds. MIT Press.
- [Reynolds, 1987] Reynolds C. W., 1987. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, in *Computer Graphics*, 21(4). SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, pp. 25-34.
- [Rist, 1996] Rist G. 1996. Le développement, Histoire d'une croyance occidentale. Presses de Sciences Po, Paris.
- [Riolo et al., 2001] Riolo, R. L., Cohen, M. D. and Axelrod, R, 2001. Evolution of cooperation without reciprocity. *Nature*, 411:441-443.
- [Roggero & Vautier, 2003] Roggero P. & Vautier C., 2003. Le développement durable en question et en action. In: *Introduction à la Rencontre de Toulouse, 21 Mai 2003, organisée dans le cadre du LEREPS-CIRESS , par l'Atelier - Forum MCX 33 sur les thèmes Délibération et gouvernabilité des systèmes complexes territoriaux*
- [Rosen, 1985] Rosen R., 1985. Anticipatory Systems - Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations. Pergamon Press.
- [Rossi & Courdin, 2006] Rossi V., Courdin V. 2006. La experiencia de la Colonia 19 de Abril, Paysandú. In *Construcción de políticas de tierra, colonización y desarrollo en Uruguay*. Cap I. Departamento de Publicaciones, UdelaR. 61-69.
- [Rouchier, 2003] Rouchier J., 2003. Re-implementation of a multi-agent model aimed at sustaining experimental economic research: The case of simulations with emerging speculation. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 4 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/7.html>>

- [Rouchier, 2006] Rouchier J., 2006. Data gathering to build and validate small scale social models for simulation. Rennard, J.P., (Ed), Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economics and Management, Hershey:IGR. ISBN: 1-59140-984-5 pp 198-210.
- [Rykiel, 1996] Rykiel E. J., Jr. 1996 Testing ecological models : the meaning of validation. In : Ecological Modelling 90. pp. 229-244.
- [Sabater et al., 2006] Sabater, J., Paolucci, M. and Conte, R. 2006. Repage: REputation and ImAGE Among Limited Autonomous Partners. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 9(2), (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/2/3.html>)
- [Salk, 1983] Salk, J., 1983. Anatomy of reality: Merging of intuition and reason. In R. N. Anshen (Ed.), Convergence. New York: Columbia University Press.
- [Saltelli et al., 2000] Saltelli A., Tarantola S., Compolongo F., 2000. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. Stat. Sci. 15 (4), p. 377-395.
- [Saltelli et al., 2003] Saltelli A., Tarantola S., Compolongo F. and Ratto M., 2003. Sensitivity analysis in practice : a guide to assessing scientific models. Wiley & Sons, New York.
- [Sato, 2004] Sato T., 2004. Starting Journal of the Earth Simulator - Dawning of New Era in Simulation Science - The Journal of the Earth Simulator, Volume 1, April 2004.
- [Sato, 2005] Sato T., 2005. Macro-Micro Interlocked Simulator. In, Journal of the Earth Simulator, Volume 4, December 2005, 46-51
- [Schaefer, 1957] Schaefer M.B., 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean, Inter-American Tropical Tuna Communication Bulletin, vol.2, n°6, p. 245-285, 1957.
- [Scheps, 1996] Scheps R., 1996. Les sciences de la prévision. Éditions du Seuil / France Culture, collection Points Sciences. ISBN 2-02-030020-6. octobre 1996. pp. 222
- [Sepúlveda et al., 2002] Sepúlveda Negrete J., Théry H., Velut S., 2002. Chili, un modèle au carré. Mappemonde, n° 65, p. 12-16.
- [Sichman et al., 1994] Sichman, J. S., Conte, R., Castelfranchi, C. & Demazeau, Y., 1994. A Social Reasoning Mechanism Based On Dependence Networks. Pages 188-192 of : Cohn, A. G. (ed), Proceedings of the Eleventh European Conference on Artificial Intelligence. Chichester : John Wiley & Sons.
- [Simon, 1978] Simon H. A., 1978. Rational decision-making in business organizations. Nobel Memorial Lecture, 8 December, 1978. Disponible en ligne : http://nobelprize.org/nobel_prizes/economics/laureates/1978/simon-lecture.pdf
- [Singh, 1996] Singh Munindar P., 1996. Toward interactionoriented programming. In Poster at International Conference on Multiagent Systems (ICMAS), Kyoto, Japan, pages pp. 460-465, December 1996.
- [Standish, 2006] Standish Russell K., 2006. Agent Based Modelling Frameworks. A paraître.
- [Starfield et al., 1990] Starfield, A.M., Smith, K.A., Bleloch, A.L., 1990. How to Model it: Problem Solving for the Computer Age. McGraw-Hill, New York.
- [Steels, 1995] Steels Luc, 1995. The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Agents. Robotics and Autonomous Systems, 15 (1-2).
- [Stewart, 2002] Stewart J., 2002. La modélisation en biologie. In, Pascal Nouvel, Enquête sur le concept de modèle. PUF, collection Sciences, histoire et société. Paris
- [Stinckwich, 2003] Stinckwich S., 2003. L'anticipation dans les systèmes complexes. conséquences pour la simulation. In 9ièmes Journées de Rochebrune, Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, 2003.
- [Sudgen, 1989] Sudgen R., 1989. Spontaneous order. Journal of Economic Perspectives 3 (4): 85-97.
- [Thébaud & Locatelli, 2001] Thébaud O. and Locatelli B., 2001. Modelling the emergence of resource-sharing conventions: an agent-based approach. Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 4, no. 2, <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/3.html>>
- [Thery, 2002] Thery, H. 2002. Ciências Sociais e a identidade da Geografia. In Ciência e Filosofia: interdisciplinariedade e interfaces de conhecimento. XVIII Semana de Geografia da Universidade Estadual de Londrina, Parana. 20 septembre 2002.
- [Thom, 1972] Thom R. 1972. Stabilité structurelle et morphogénèse, essai d'une théorie générale des modèles. InterEditions, 2e éd. revue, corrigée et augmentée. Edition originale 1968. ISBN 2-7296-0081-7. (la première version de son livre date de 1968)
- [Thom, 1978] Thom R. 1978. Modélisation et scientificité, P. Delattre, M. Thellier, éd., Élaboration et justification des modèles. Actes du colloque, ENS, 9-14 oct. 1978. Tome 1, Maloine-Doin, Paris, pp 21-29
- [Thom, 1991] Thom R., 1991. Prédire n'est pas expliquer, éd. Eshel, coll. la Question, Paris, 1991. 173p.
- [Tourrand et al., 1999] Tourrand, J.F.; Veiga, J.B.; Ferreira, L.A.; Ludovino, R.M.R.; Pocard-Chapuis, R.; Simão Neto, M. Cattle ranching expansion and land use change in the Brazilian eastern Amazon. In: Conference On Patterns and Processes of Land Use and Forest Change In The Amazon, Gainesville, FL, USA: University of Florida, 1999. p.15.

- [Tourrand et al., 2002] Tourrand JF, Piketty MG, Oliveira JRD, et al. Élevage bovin, déforestation et développement régional : le cas du Sud du Para, Amazonie Brésilienne. *Bois et Forêts des Tropiques* 2002 ; 280 : 5-16.
- [Travers, 1996] Travers M. D.: *Programming with Agents: New metaphors for thinking about computation*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 127-137 1996.
- [Treuil & Mullon, 1996] Treuil J.P. & Mullon C., 1996. Expérimentation sur mondes artificiels: pour une réflexion méthodologique. In, *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*. Actes des journées du programme Environnement, Vie et Sociétés. Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris, 15-17 janvier 1996.
- [Treuil et Lobry, 2003] Treuil J.P. et Lobry C. 2003. Compte-rendu de l'atelier AME : Formalisations mathématiques et informatiques. Session 5 du 6 novembre 2003. <http://www.ird.fr/fr/science/drv/realisations/ame/pdf/session5.pdf>
- [Uchmanski & Grimm, 1996] Uchmanski, J., Grimm, V., 1996. Individual-based modelling in ecology: what makes the difference? *Trends Ecol. Evol.* 11, 437-441.
- [Uhrmacher & Schattner, 1998] Uhrmacher, A.M. & Schattner, B. 1998. Agents in discrete event simulation. In : *European Simulation Symposium*. SCS, Nottingham, October 1998.
- [Ulrich & Troitzsch, 2005] Ulrich F. & Troitzsch K.G., 2005. Epistemological Perspectives on Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 8, no. 4 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/7.html>>
- [Vanbergue & Meurisse, 2002] Vanbergue D. & Meurisse T., 2002. De la simulation multi-agent... Rencontres parisiennes sur les Systèmes Multi-agents.
- [Vanbergue, 2003] Vanbergue, Diane. 2003 (12 décembre). Conception de simulation multi-agents : Application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, Paris.
- [Varela, 1979] Varela F., 1979. *Principles of Biological Autonomy*. Elsevier, New York, NY, USA.
- [Varenne & Phan, 2006] Varenne F. & Phan D., 2006. Epistémologie dans une coquille de noix : concevoir et expérimenter. In : *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, (annexe du chapitre 4), Amblard F. and Phan D. (eds.), Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, ISBN : 2-7462-1310-9.
- [Varenne 2003] Varenne F., 2003. La simulation conçue comme expérience concrète. Actes des 10èmes journées de rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels (Rochebrune, 2003), éditions de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris (ENST), pp. 299-313.
- [Varenne, 2001] Varenne F. 2001. What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France). *Simulation in industry - ESS 2001*, Proc. of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, October 18-20th, 2001, ed. by N. Giambiasi and C. Frydman, SCS Europe Bvba, Ghent, pp. 549-554. Accessible sur : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/02/89/86/PDF/Varenne%20ESS%202001%20RTF.pdf>
- [Varenne, 2004] Varenne F., 2004. Le destin des formalismes : à propos de la forme des plantes - Pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur. Thèse de doctorat de l'université de Lyon 2, Histoire des sciences.
- [Varenne, 2006] Varenne F. 2006. Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations, Paris, Pétra, 2006, 97p. Disponible : http://leshumas.insa-lyon.fr/stoica/page.php4_fichiers/Publications_THEMES_CROISES/ACTA_STOICA_Varenne.pdf
- [Veiga et al., 2004] Veiga J.B., Tourrand J.F., Piketty M.G., Pocard-Chapuis Alves A.M., Thales M.C. 2004. *Expansão e trajetórias da pecuária na Amazônia: Estado do Pará*. Editora da Universidade de Brasília, Brasil, v.1. p.161
- [Verhulst, 1838] Verhulst P. F., 1838. Notice sur la loi que suit la population dans son accroissement. *Corr. Math. et Phys.* 10, 113 – 121
- [Vieira Pak, 2008] Vieira Pak M., 2008. O modelo Transamazon: uma análise para melhorar suas limitações por meio da participação social. Universidade de Brasília – UnB, Centro de desenvolvimento sustentável – CDS.
- [Volterra, 1926] Volterra V., 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. *Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. Ser. VI*, vol. 2.
- [Volterra, 1931] Volterra, V., 1931. *Leçons sur la Théorie Mathématique de la Lutte pour la Vie*. Gauthier-Villars, Paris.
- [Von Bertalanffy, 1968] Von Bertalanffy L., 1968. *General Systems Theory, Foundation, Development, Applications*, New York: G. Braziller, trad. française: 1973, *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod.
- [Von Randow, 2003] Von Randow, Gero 2003. When the centre becomes radical. In, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 1 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/1/5.html>>
- [Watzlawick et al., 1975] Watzlawick P., Weakland J. et Fish R., 1975. *Changements : paradoxes et psychothérapie*. Ed. Seuil, Coll. Points, 1981 pour la traduction française.
- [Watzlawick, 1978] Watzlawick P. 1978. *La réalité de la réalité - Confusion, désinformation, communication*. Ed. Seuil, coll. Points, 1984 pour la traduction française.

- [Weber et Bailly, 1993] Weber, J. and D. Bailly. (1993). "Prévoir c'est gouverner." *Natures, sciences, sociétés* 1(1).
- [Weber, 1995] Weber J., 1995. *Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques*. Montpellier.
- [Weisbuch et al. 1997] Weisbuch G., Kirman A. & Herreiner D., 1997. Market organisation. In, Conte R., Hegeslmann R., Terna P. (eds), *Simulating Social Phenomena*; Berlin, Springer Verlag, p. 221 - 240.
- [Weisbuch, 1989] G. Weisbuch, *Dynamique des systèmes complexes: une introduction aux réseaux d'automates*, collection Savoirs Actuels, InterEditions/Editions du CNRS. Paris. (Edition épuisée mais disponible sur internet : <http://www.lps.ens.fr/~weisbuch/livre/livcsd.html>). Traduction anglaise: *Complex Systems Dynamics*, Santa-Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley, Redwood City, CA, USA (1990).
- [Weiss, 1999] Weiß G. (Ed.) 1999. *Multiagent systems. A modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT Press. (ISBN 0-262-23203-0). 1999
- [Weyns & Holvoet, 2003a] Weyns D. et Holvoet T., 2003b. Synchronous versus Asynchronous Collaboration in Situated Multi-Agent Systems, 2th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, AAMAS'03, Melbourne, Australia, July 14-18, 2003
- [Weyns & Holvoet, 2003b] Weyns D. and Holvoet T. 2003. Model for Simultaneous Actions in Situated Multi-agent Systems. M. Schillo et al. (Eds.): *MATES 2003, LNAI 2831*, pp. 105-118, 2003. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [Wilensky & Reisman, 2006] Wilensky, U., & Reisman, K., 2006. Thinking Like a Wolf, a Sheep or a Firefly: Learning Biology through Constructing and Testing Computational Theories -- an Embodied Modeling Approach (PDF). *Cognition & Instruction*, 24(2), pp. 171-209.
- [Wittgenstein, 1956] Ludwig von Wittgenstein, *Remarques sur les fondements des mathématiques* Wittgenstein L. 1956, trad. M.-A. Lescourret, Paris, Gallimard, 1983, in : *Revue de Synthèse*, 4ème série, n° 1-2 (janvier à juin 1986)151-152.
- [Wolfram, 2002] Wolfram S., 2002. *A new kind of science*. Wolfram Media. ISBN 1-57955-008-8. 1197 p. Disponible en ligne : <http://www.wolframscience.com/nksonline>
- [Wooldridge et Jennings, 1995] Wooldridge, M. & Jennings, N. R. 1995. *Intelligent agents : Theory and practice*. The Knowledge Engineering Review, 10(2), 115-152.
- [Wooldridge, 1999] Wooldridge Michael, 1999. *Intelligent agents*. In G. Weiß (Ed.). *Multiagent systems. A modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT Press. (ISBN 0-262-23203-0). 1999
- [Zeigler et al., 2000] Zeigler, B.P., Praehofer, H. et Kim, T.G., 2000. *Theory of Modelling and Simulation: 2nd Ed.: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, Academic Press.
- [Zeigler, 1972] Zeigler, Bernard P. 1972. Toward a Formal Theory of Modeling and Simulation : Structure Preserving Morphisms. *Journal of the ACM (JACM)*, 19(4), 742-764.

ANNEXES

1 EXEMPLE DE MODELE MATHEMATIQUE : LE MODELE DE VOLTERRA

Ce modèle est aussi connu sous le nom de Lotka-Volterra¹³⁶, mais beaucoup s'accordent à dire que V. Volterra est à l'origine de ce travail en imaginant un système proie-prédateur après la première guerre mondiale. Il cherchait à modéliser l'évolution des sardines et des requins dans la mer Adriatique pour expliquer notamment pourquoi les quantités de sardines pêchées après l'interruption due à la guerre n'étaient plus aussi importantes que précédemment (ce qui peut sembler contre intuitif) et pourquoi à la reprise de la pêche la proportion observée de requins avait augmenté. Ce modèle se présente sous la forme de deux équations différentielles.

Si on note x la densité des proies et y , celle des prédateurs. En l'absence de prédation, les prédateurs meurent et les proies croissent sans limite :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = +n.x \\ \frac{dy}{dt} = -m.y \end{cases}$$

Le paramètre n représente le taux de croissance des proies en l'absence de prédation et le paramètre m le taux de mortalité des prédateurs en l'absence de proies.

La résolution de ces deux équations indépendantes montre des dynamiques exponentielles, positive dans le cas des proies et négative pour les prédateurs. Les deux graphiques suivant ont été réalisé avec le logiciel Stella :

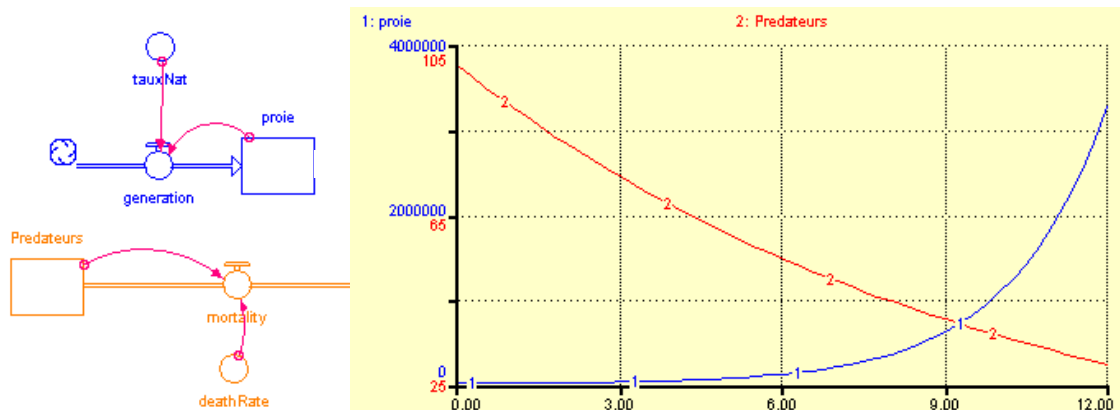


Figure 1 : Le modèle sans interaction formalisé sous Stella (à droite) et les courbes évolutives (à gauche). Les boîtes "proie" et "prédateur" correspondent respectivement aux variables x et y .

La première loi de Volterra : les proies et les prédateurs se rencontrent au hasard, à chaque rencontre un prédateur a la possibilité de manger sa proie :

¹³⁶ Alfred Lotka (1880-1949) était chimiste, démographe, écologiste et mathématicien. Vito Volterra (1860 – 1940) était un mathématicien et physicien italien (il fut un opposant au fascisme, n'hésitant pas à renoncer aux honneurs académiques par conviction politique).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = +n.x - p.x.y \\ \frac{dy}{dt} = -m.y + p.x.y \end{cases}$$

Le paramètre p agrège deux notions : il représente l'efficacité de la prédation, mais aussi l'hétérogénéité du milieu qui permet aux proies de se cacher des prédateurs. Ces derniers voient leur taille augmenter de façon proportionnelle au nombre de proies capturées (+/- $p.x.y$). Le comportement du modèle est alors radicalement différent :

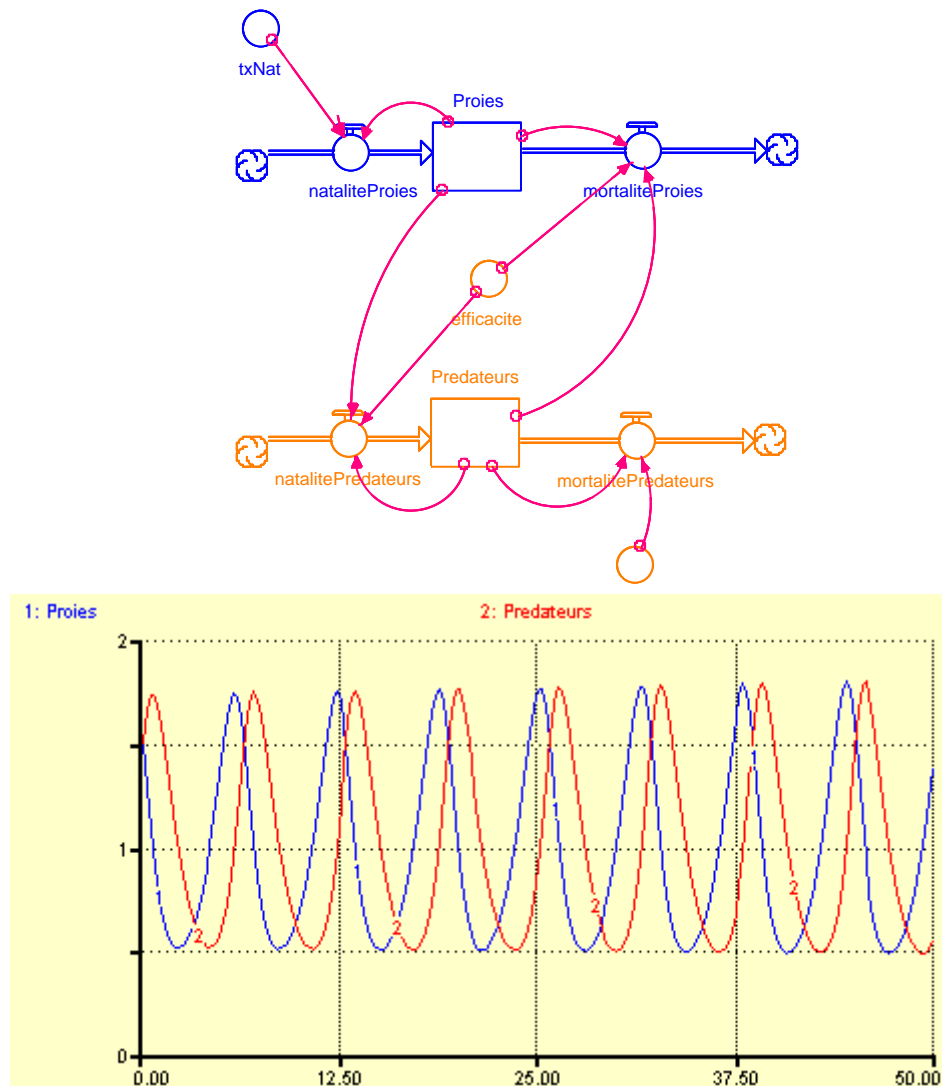


Figure 2 : Le modèle avec interaction formalisé sous Stella (en haut) et les courbes évolutives (en bas). Les paramètres ont été fixés à 1 ($n=m=p=1$) et les densités initiales des deux populations valent 1,5.

Ainsi, un modèle proie-prédateur très simple peut présenter des fluctuations périodiques. C'est un résultat très important du point de vue biologique : en l'absence de toute perturbation extérieure il peut très bien arriver que les populations fluctuent grandement. L'observation de fluctuations ne signifie donc pas obligatoirement que le système soit perturbé; il peut s'agir d'une propriété intrinsèque comme le concevait V. Volterra :

Certainement, il existe des circonstances ambiantes périodiques comme celles, par exemple qui dépendent de la succession des saisons, et qui produisent des oscillations forcées ou de caractère externe, dans le nombre des individus des diverses espèces. A côté de ces actions périodiques externes qui ont été plus spécialement étudiées du côté

statistique, n'y en a-t-il pas d'autres de caractère interne avec des périodes propres, indépendantes des causes externes et qui se superposent à celles-ci ?

Leçons sur la Théorie Mathématique de la Lutte pour la Vie. [Volterra, 1931]

Donc le modèle théorique explique bien ce qui peut être à priori contre intuitif pour l'être humain. Il devient dès lors plus aisé de deviner en quels points du cycle se trouvait l'écosystème à la reprise de la pêche après la guerre.

Mais les oscillations régulières qu'on obtient sont liées à la valeur particulière des paramètres. Après plusieurs approximations pour résoudre ce système, dont celle de se trouver proche du point d'équilibre, on montre que :

$$x(t) = 2 \cdot x_0 \cdot \cos(\sqrt{n \cdot m} \cdot t) \quad \text{et} \quad y(t) = 2 \cdot x_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{n}} \cos(\sqrt{n \cdot m} \cdot t)$$

Cependant, dès qu'on change les valeurs des paramètres, on n'obtient plus les mêmes réponses :

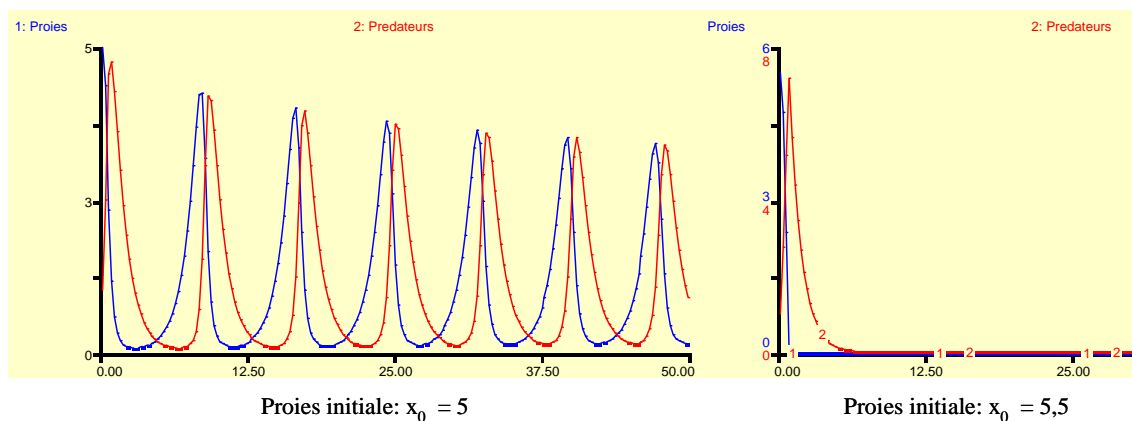


Figure 3 : Résultats des fluctuations des deux populations avec les mêmes valeurs des paramètres que précédemment, sauf pour la densité initiale des proies : 5 à gauche et 5,5 à droite.

Le modèle continue à fluctuer mais plus de façon sinusoïdale et si le nombre de proie est trop élevé au départ, les prédateurs se développent trop et exterminent les proies, ce qui conduira à leur perte. On peut remarquer qu'on obtient le même type de résultat avec le modèle ECEC : trop d'énergie initiale des plantes conduit à une explosion des ruminants et est suivie par leur extinction.

Les présentations de ce modèle sont souvent accompagnées de données historiques : une des séries temporelles les plus célèbres concerne les fluctuations de populations de lynx du Canada, estimées à partir des prises faites par les trappeurs. Ces données sont tirées d'un travail effectué par Elton et Nicholson en 1942 à partir des registres de la compagnie de la baie d'Hudson. Ces données présentent une bonne corrélation avec le modèle, cependant les décalages de fluctuations entre les lièvres et les lynx sont absents (cf. la lettre D'Ancona à Vito Volterra, voir page 24).

En fait, il a été constaté plus tard que cette série reflétait plutôt les cycles du marché américain des fourrures : la demande fluctuante pour les fourrures de lynx influait fortement les captures [Lobry, 2007].

2 MODELE D'INTERACTION INDIRECTE : CONSOMMATION D'UNE RESSOURCE COMMUNE

Pour rappel : 2 agents *A* et *B* consomment une ressource commune qui se régénère régulièrement. La régénération suit une loi arithmétique linéairement : le niveau de la ressource (*level*) augmente d'une quantité (*growIndex*) à chaque "pas de temps", sans limite supérieur. Le sous-modèle s'écrit donc:

$$\text{level}_{t+1} = \text{level}_t + \text{growIndex}$$

A et *B* en prélèvent chacun une quantité (*consumption*) variable selon leur besoin. Dans le modèle original, les agents brûlent leur énergie en fonction d'un taux catabolique (*cataRate*) qui varie aléatoirement entre 0 et 10. Si le niveau d'énergie (*energy*) d'un agent est supérieur à un seuil (*hungryThreshold*), il ne fait rien. Mais si l'agent a faim, il consomme, si possible, une quantité de la ressource jusqu'à atteindre un seuil de satiété (*satietyThreshold*).

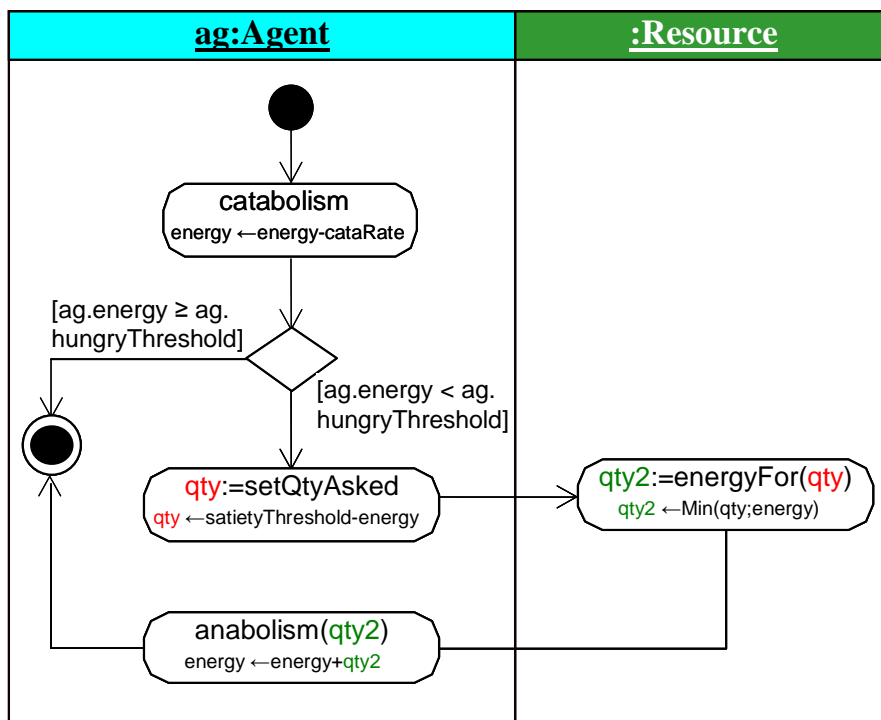


Figure 4 : Diagramme d'activité du "step" de l'agent montrant son catabolisme puis son anabolisme par prélèvement sur la ressource.

Le diagramme de classe suivant décrit la structure du modèle :

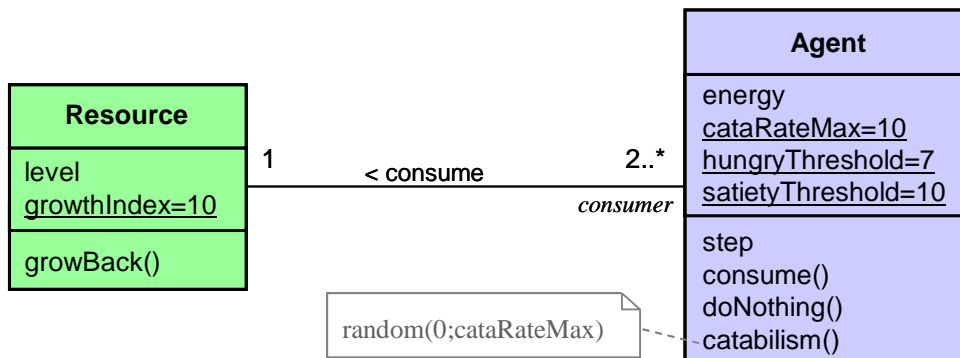


Figure 5 : Diagramme de classe du modèle de consommation d'une ressource commune.

La consommation de la ressource est effectuée selon deux procédés :

Le scénario 1 correspond à une consommation séquentielle où chaque agent consomme directement la quantité voulue au moment de son activation. L'ordre d'activation des agents est mélangé aléatoirement à chaque "pas de temps".

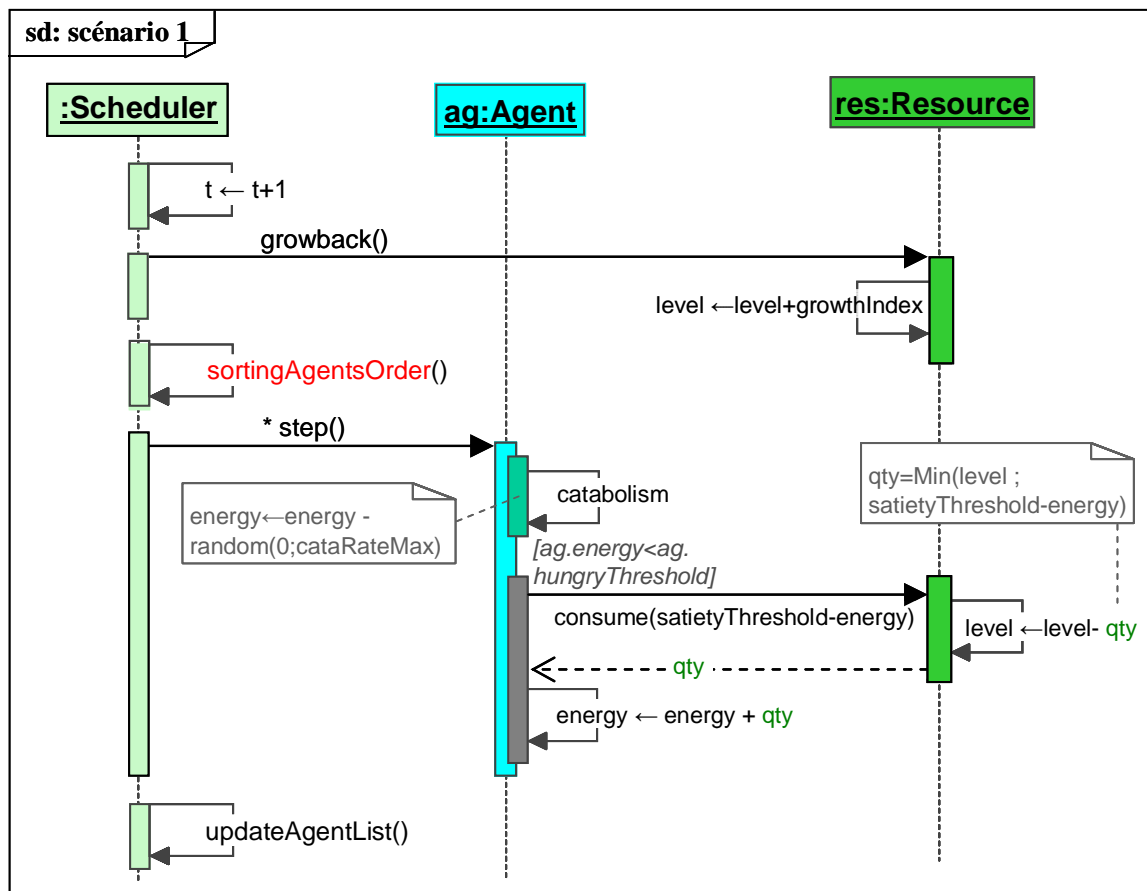


Figure 6 : Diagramme de séquence du scénario 1

Le scénario 2 obéit d'avantage au principe "Influences-Réaction" pour respecter une simultanéité des actions des agents sur la ressource. Chacun émet une influence de prélèvement et l'environnement y réagit en fournissant à chacun une quantité calculée selon la règle suivante : si le niveau de la ressource est suffisant pour répondre à la demande totale, chaque agent reçoit la quantité désirée. Si la demande totale est trop élevée, alors chacun reçoit une quantité proportionnelle à sa demande initiale.

Les détails de ce modèle sont présentés sur les deux figures suivantes. Concrètement, pour le scénario 2, le simulateur que j'ai implémenté utilise une gestion synchrone de type automate cellulaire : chaque agent calcule ses besoins, puis dans un deuxième temps la ressource distribue à chacun une quantité proportionnelle à sa demande.

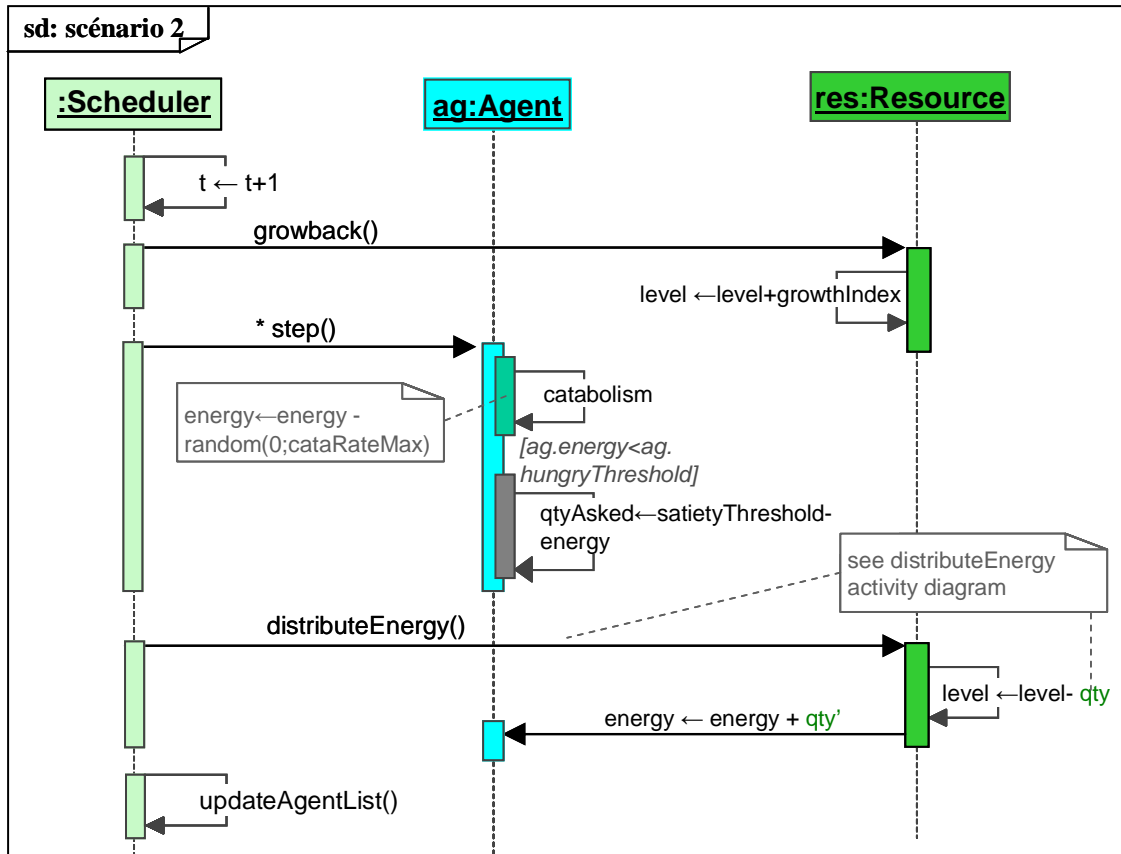


Figure 7 : Diagramme de séquence du scénario 2

La distribution des quantités que chaque agent reçoit, est décrite par le diagramme d'activité suivant :

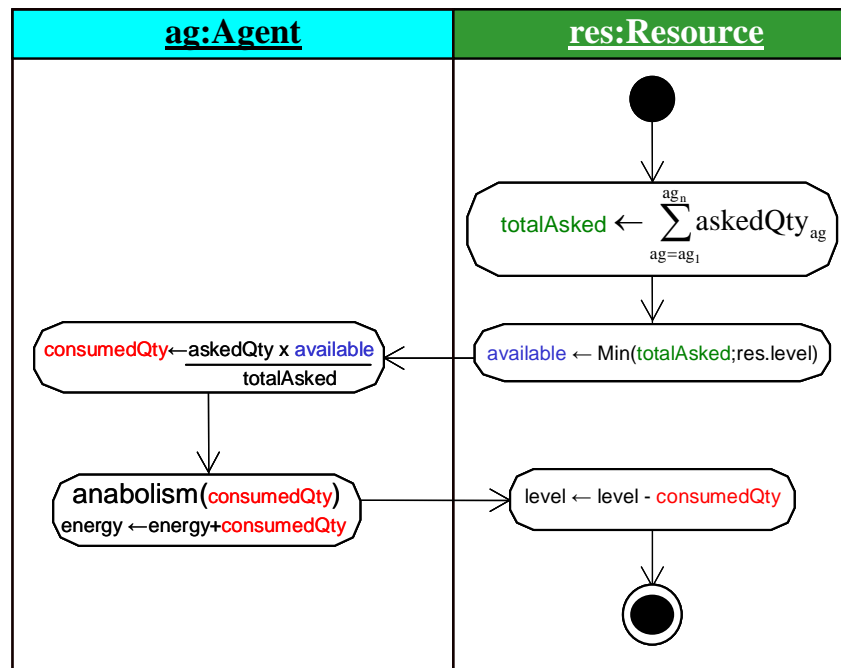


Figure 8 : Diagramme d'activité présentant la distribution de la ressource pour le scénario 2.

3 LE MODELE ECEC : EVOLUTION DE LA COOPERATION DANS UN CONTEXTE ECOLOGIQUE

Le modèle ECEC a été conçu à l'origine par [Pepper et Smuts, 2000] et [Pepper et Smuts, 2002] et nous l'avons re-formalisé et répliqué. La version présentée ici est un peu plus simple que la version originale mais elle est plus claire et tout aussi suffisante pour illustrer des résultats non-triviaux malgré sa simplicité. Cette version constitue à mes yeux un modèle-école car il permet de présenter et d'expliquer facilement les SMA pour la gestion des ressources. Sa structure et son fonctionnement sont faciles à comprendre. Il est spatialisé et il illustre deux dynamiques couplées : une dynamique naturelle de croissance de végétation et une dynamique d'agents en compétition (cf. chap. 3.5.3). Par ailleurs, il permet d'illustrer deux modèles fameux de la biologie comme nous le verrons au paragraphe des résultats.

Explication textuelle

Le modèle contient deux types d'entités : des plantes et des ruminants.

Les plantes ne bougent pas, ne se reproduisent pas et ne meurent pas. Elles sont créées à l'initialisation en un lieu donné fixe. Leur seul comportement est de croître : à chaque pas de temps, chaque plante augmente sa quantité d'énergie X selon l'équation logistique discrète :

$$X_{t+1} = X_t + rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right)$$

Avec X_t la quantité d'énergie de la plante au temps t , r le taux intrinsèque de croissance et K , la capacité de charge de l'espace pour supporter cette plante.

Le modèle logistique a été présenté au chapitre 5.2.4 (Exemple de modèle à temps discret : équation logistique discrète).

Les fonctions biologiques des ruminants :

Un ruminant se nourrit des plantes qu'il trouve. Il augmente son propre niveau d'énergie en diminuant d'autant celui de la plante. Les ruminants consomment de l'énergie en fonction de leur niveau métabolique. Ce niveau est le même pour tous les ruminants, qu'ils bougent ou non. Il est fixé à 2 unités d'énergie par période de temps. Si son niveau d'énergie atteint zéro, le ruminant meurt.

Il y a 2 types de ruminants qui diffèrent seulement par leur façon de se nourrir: Quand un ruminant "restreint" mange, il ne prélève que 50% de l'énergie de la plante. A l'opposé, un ruminant "non-restreint" mange 99% de la plante (ce paramètre est juste inférieur à 100% pour que la plante puisse continuer à croître plutôt qu'être complètement détruite).

Lorsque le niveau d'énergie d'un ruminant atteint le seuil de fertilité (100 unités d'énergie), il se reproduit de façon asexuée : il crée un nouveau né héritant de ses caractéristiques (c'est-à-dire de sa stratégie d'alimentation). Il donne au nouveau-né la moitié de son énergie. Le nouveau-né est placé sur la place libre la proche de son parent.

Règles de déplacement des Ruminants : A chaque pas de temps, un ruminant examine les places qui l'entourent. Parmi celles qui ne sont pas déjà occupées, il choisit celle contenant le plus d'énergie. Si le niveau d'énergie de la plante est supérieur au seuil métabolique du ruminant, il se déplace sur cette place et consomme la plante. Dans le cas contraire (le niveau d'énergie de la plante est inférieur au seuil métabolique), il se déplace aléatoirement sur une place libre adjacente. Cette règle conduit à l'émigration

d'agents se trouvant dans des zones pauvres en plantes. Elle simule le comportement d'individus exploitant des ressources locales mais qui migrent plutôt que mourir de faim quand les ressources sont au plus bas.

Initialement, chaque agent est placé aléatoirement sur l'espace. Son niveau d'énergie est un nombre aléatoire compris entre zéro et le seuil de fertilité. Deux paysages initiaux sont proposés : l'un est homogène (le niveau d'énergie de chaque plante est un nombre aléatoire compris entre zéro et K) et l'autre est fragmenté (des zones de 9 plantes sont régulièrement dispersées et séparées les unes des autres par 6 places vides).

Description en UML

Le diagramme de classe suivant décrit la structure du modèle.

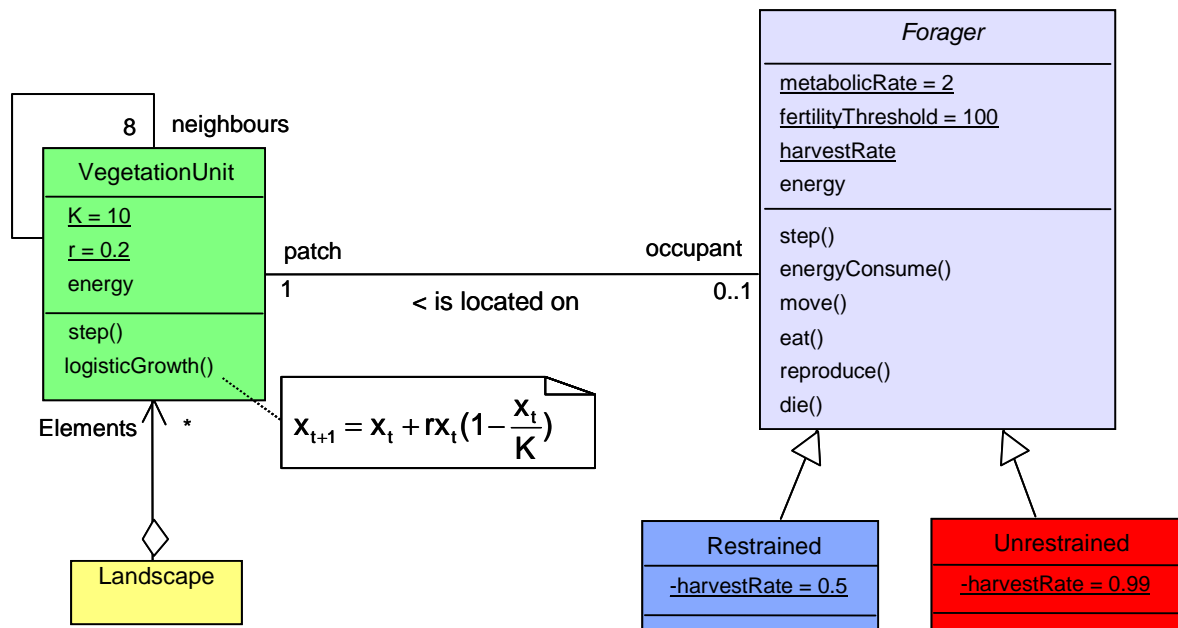


Figure 9 : Diagramme de classe de ECEC

Concrètement, l'entité plante (*VegetationUnit*) est implémentée sous la forme d'un automate cellulaire. Le diagramme suivant décrit la séquence principale d'un pas de temps.

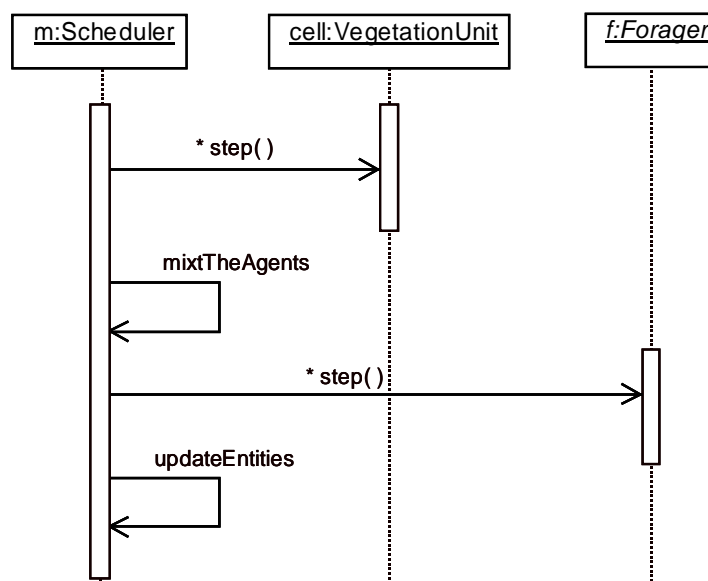


Figure 10 : Diagramme de séquence principal décrivant un pas de temps de ECEC.

La méthode "step" d'une plante (*VegetationUnit*) ne nécessite pas une activation synchrone d'un automate cellulaire car il n'y a aucun processus de diffusion. La méthode "step" d'un ruminant est décrite par le diagramme d'activité de la figure 11-A. A chaque pas de temps, un ruminant décrémente son niveau courant d'énergie par 2 (son taux métabolique). Puis il se déplace sur une cellule de son voisinage, libre et contenant le plus d'énergie. Sur place, il consomme la plante en fonction de son taux de prélèvement (50% ou 99%). Ensuite il cherche à se reproduire (voir diagramme de séquence 11-B). Enfin, il teste son niveau d'énergie. Si celui-ci est inférieur à zéro, le ruminant meure.

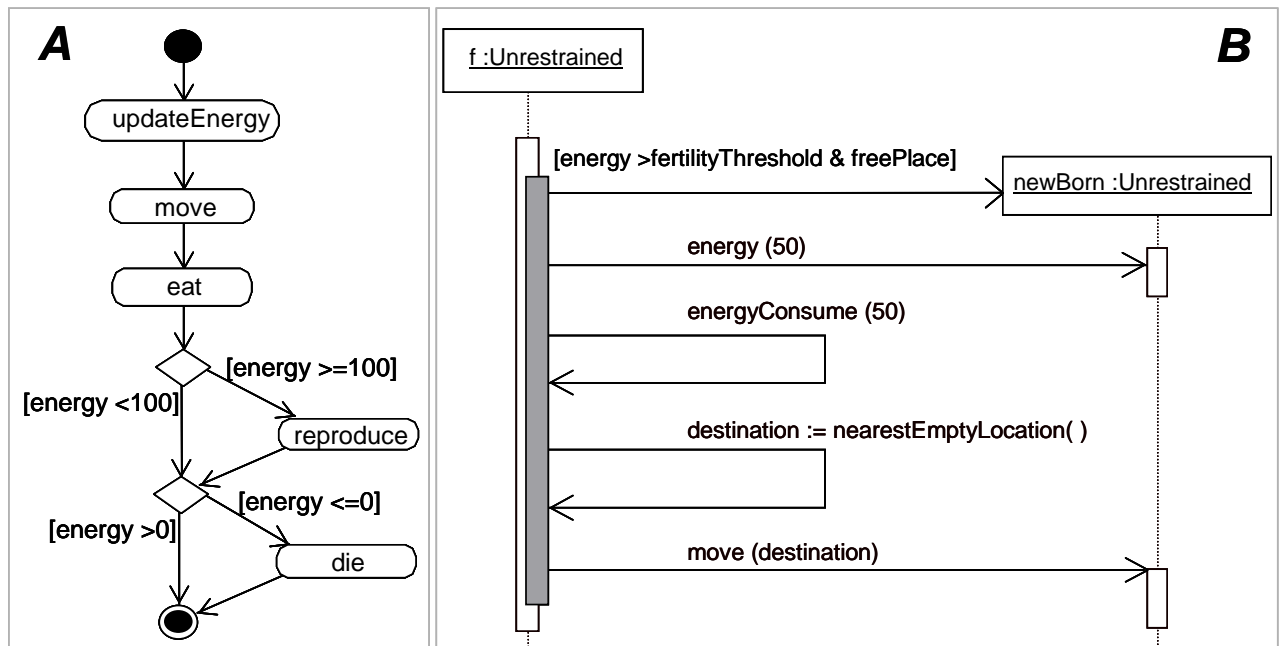


Figure 11 : A- Diagramme d'activité décrivant le "step" d'un ruminant.

B- Diagramme de séquence de la reproduction d'un ruminant.

Quelques résultats

Initiées sur un paysage homogène (quand le niveau d'énergie de chaque plante est un nombre aléatoire compris entre zéro et K), les simulations illustrent dans leur grande majorité le principe de Gause [1935] encore appelé principe d'exclusion compétitive : deux espèces ne peuvent coexister indéfiniment si elles sont en compétition sur une ressource limitée ; elles ne peuvent occuper la même niche écologique et l'espèce la plus performante (mesurée en terme de fitness de population) élimine l'autre. Dans notre cas, l'espèce des ruminants la plus vorace (non-restreints) exclut l'espèce la moins vorace en consommant la majorité des plantes et en se reproduisant plus rapidement (voir résultat au chapitre 4.3.2 page 80).

Mais, en partant d'un paysage fragmenté où des patches de 9 plantes sont régulièrement dispersés et séparés les uns des autres par 6 places vides, les résultats sont inversés : la population avec la meilleure fitness disparaît quand la population des restreints survie. Ce résultat étonnant est une réfutation du principe de Gause.

On peut également comparer ECEC avec d'autres modèles classiques de l'écologie tels que le modèle de Lotka-Volterra. Dans ce cas le simulateur est initié avec une seule population d'agents restreints ou non-restreints qui jouent alors le rôle de prédateurs. Ils prélèvent de la végétation et on peut associer les plantes aux proies du modèle de Volterra.

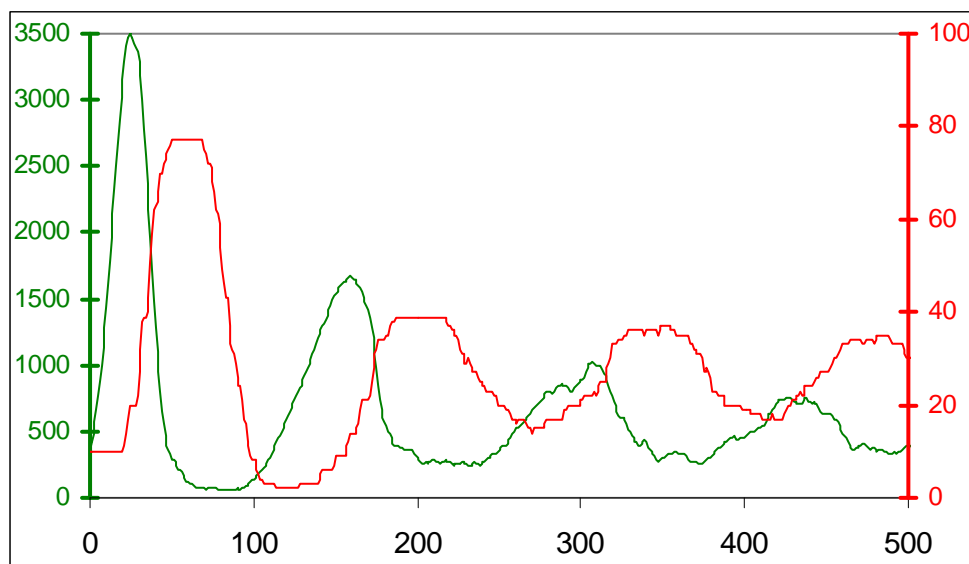


Figure 12 : Evolution de l'énergie des plantes (proies) et de la taille de la population des agents non-restreints (prédateurs)

On retrouve des résultats similaires à ceux du modèle de Volterra, c'est-à-dire des oscillations des dynamiques décalées l'une par rapport à l'autre. Ce pattern émergent est un caractère interne du modèle, indépendant de toute fluctuation externe, comme le concevait Volterra. D'autres résultats, plus étonnants encore sont disponibles au Chapitre 8 (Exploration des modèles) qui traite de l'analyse de sensibilité. Les exemples de ces analyses ont été produits à partir d'ECEC.

4 DESCRIPTIONS SUPPLEMENTAIRES DU MODELE TRANSAMAZON

Les informations présentées ici complètent celles du chapitre 11.

Descriptions

Le schéma suivant présente la structure en couche du modèle.

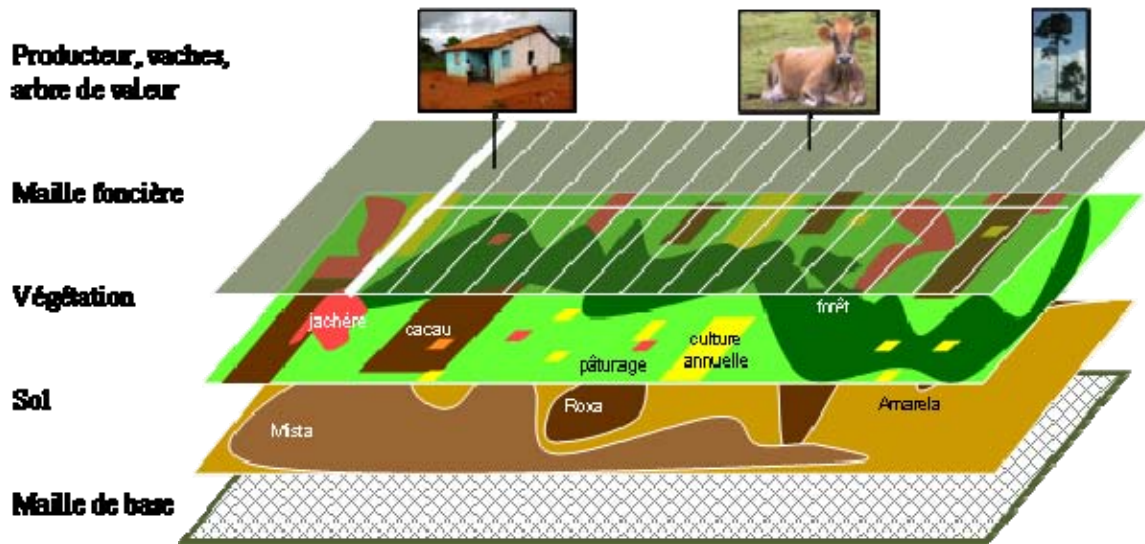


Figure 13 : Schéma de l'organisation en couche de TransAmazon.

Cultures

Sur la base du diagramme de classe de la figure 11-3 (p. 254) et des informations contenues dans le tableau 11-1, les agents peuvent calculer les profits issus de chaque culture qui correspondent à la moyenne des bénéfices des 3 dernières années. Ainsi, les coûts et les marges brutes des 6 dernières saisons sont mémorisés dans chaque couvert. On calcule alors la valeur ou le revenu moyen d'un couvert en production de la façon suivante :

Culture	
-CoutSuppression: \$/ha	
-CoutImplantation: \$/ha	
-CoutManutention: \$/ha	
-MOsuppression: jour/ha	
-MOimplantação: jour/ha	
-MOmanutention: jour/ha	
-ageTrasition: an	
-Succession: Couverture	
-production: kg/ha	
-prix/kg: \$/kg	
-coefChute/abandon	
-ageProduction	
-age: an	
-duréeAbandon	
-margesBrutes: [6]	
-coûts: [6]	
+profitMoyen()	
+valeur()	
+evoluer()	

$$\text{profitMoy(couvert)} = \sum_{t=1}^6 \text{estProductif(couvert,t)} \begin{cases} \text{non: } 0 \\ \text{oui: } \text{marge(couvert,t)} - \text{coût(couvert,t)} \end{cases}$$

avec t , le temps des 6 dernières saisons.

Exemple de calcul de valeur pour le cacao:

Valeur cacao = productif : moyenne des marges brutes sur 5 ans ou moins.
non-productif : somme cumulée des couts

$$\text{valeur(cacao)} = \text{estProductif(cacao,1)} \begin{cases} \text{non: } \sum_{t=1}^{10} \text{coût(cacao,t)} \\ \text{oui: } \text{Moy}_{t=\text{ageProduction}}^{10} \{ \text{marge(cacao,t)} \} \end{cases}$$

Figure 14 : Tous les attributs de la classe Culture et détails du calcul de la valeur et du profit moyen.

L'implantation d'une nouvelle culture s'effectue alors de la manière suivante :

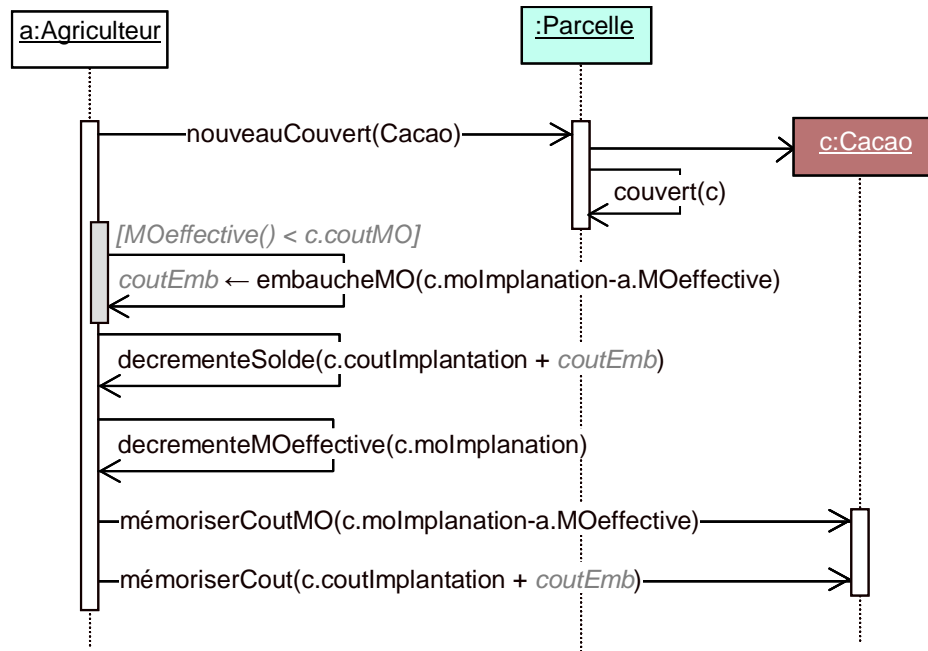


Figure 15 : Implantation d'une culture (Diagramme de séquence)

Agents

Dans *TransAmazon*, un agent social personnifie une cellule familiale de colons. Ses membres, de 2 à 8, se partagent entre les actifs (*MOactive*) et les inactifs (*inactifs*). En fonction des chiffres de l'IBGE sur Uruará, les membres d'une famille sont répartis de la façon suivante :

Tableau 1: Répartition des membres par agent-famille

membres	2	3	4	5	6	7	8
probabilité (%)	8	10	23	24	14	16	5
actifs	1	2	2 ou 3	3	3 ou 4	4	4
inactifs	1	1	1 ou 2	2	2 ou 3	3	4

A partir de calendriers conçus avec des producteurs (voir un exemple sur la figure suivante), des diagrammes d'activités des différentes catégories de producteurs ont été élaborés.

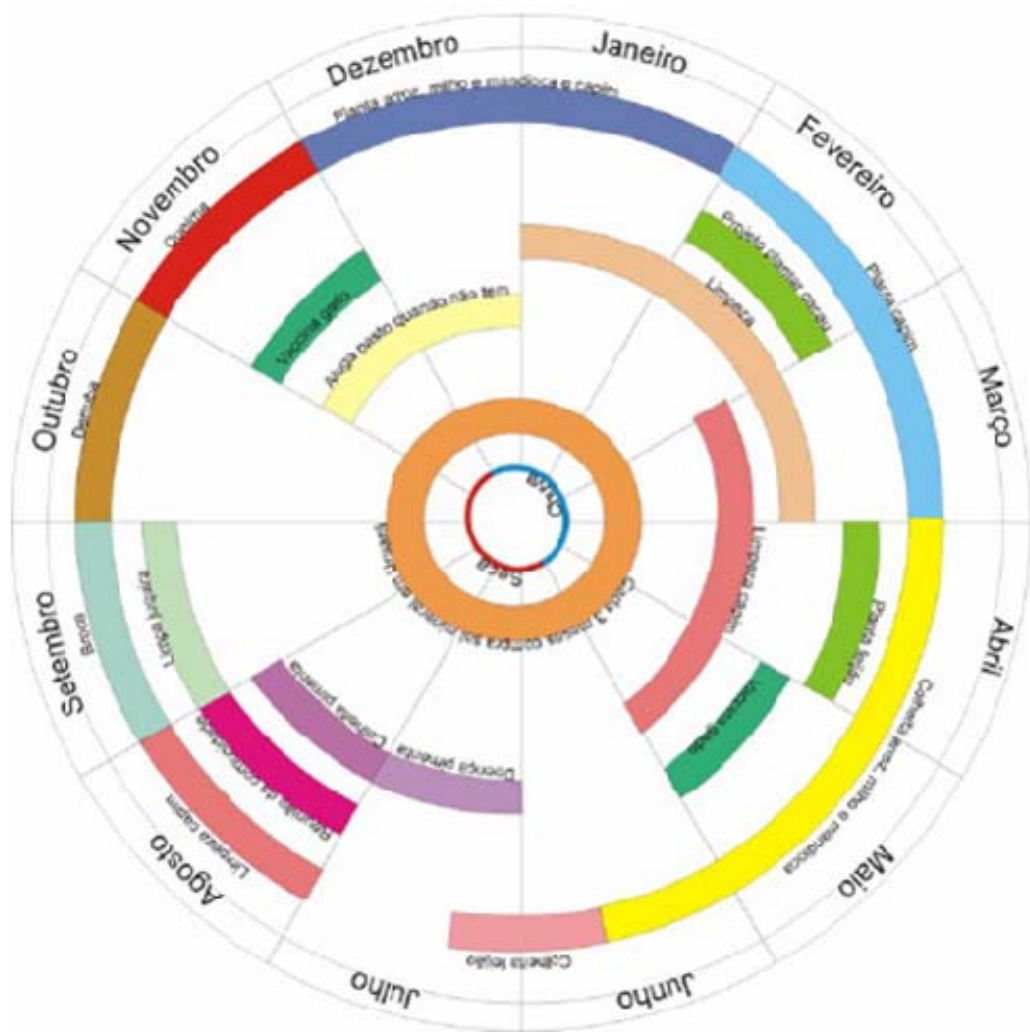


Figure 16 : Exemple de calendrier élaboré avec les producteurs, d'après [Viera Pak, 2008]

Le diagramme suivant explique les activités de gestion qu'un Eleveur effectue sur ses lots pendant la saison des pluies (*gestiões_lotes_pluies* ()). Ce diagramme est un zoom du diagramme 11-15 (page 260) qui décrit la séquence générale des activités d'un producteur.

Ce diagramme montre qu'un éleveur bovin cultive sa terre en privilégiant sa spécialité. Mais cette stratégie ne signifie pas nécessairement un abandon des autres cultures déjà en place sur le lot. Dans le cas d'un éleveur par exemple, il implante des nouveaux pâturages. Mais il continuera d'entretenir son cacao (si celui-ci est rentable) pour ne pas perdre tout l'investissement qu'il avait engagé auparavant.

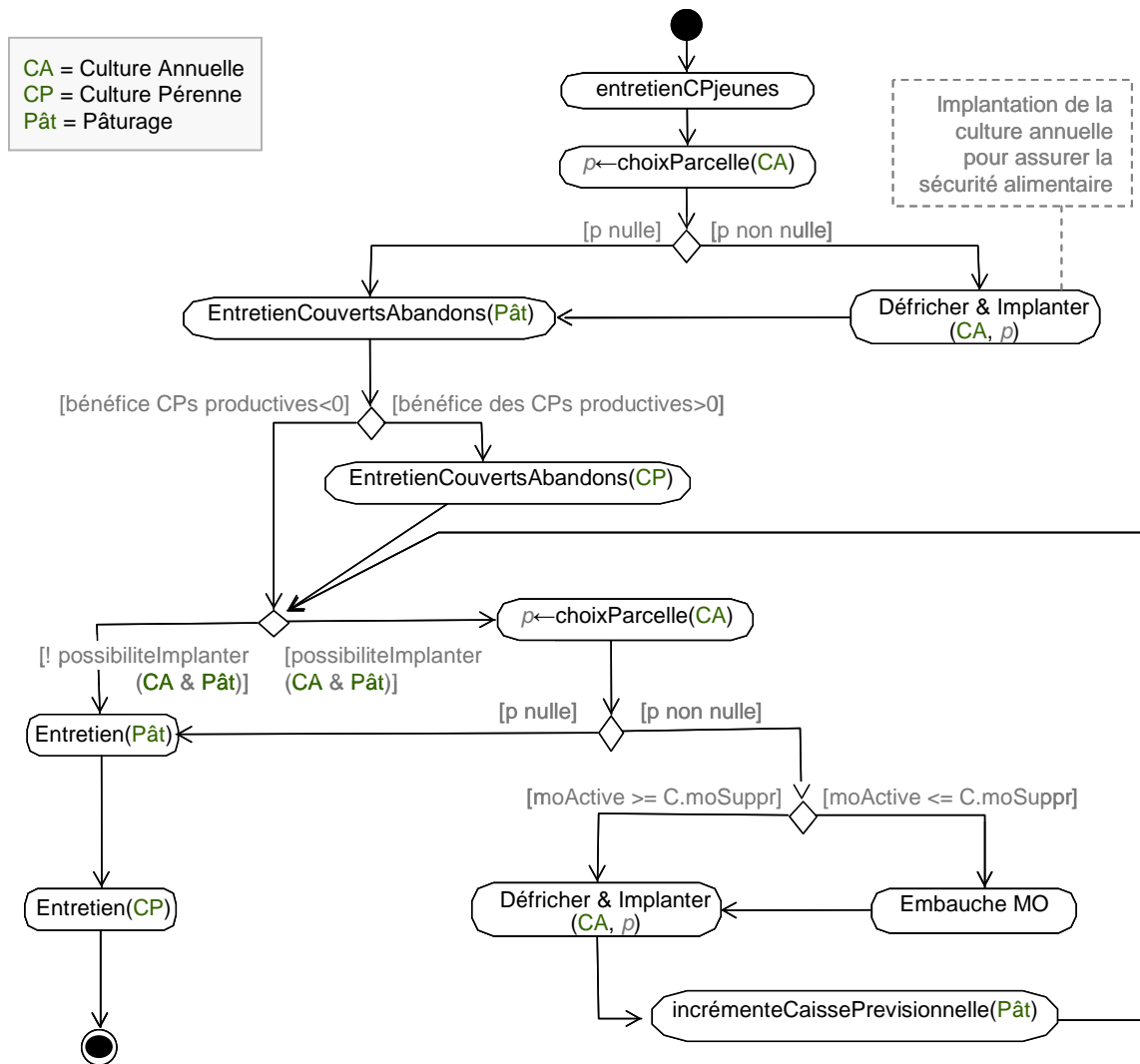


Figure 17 : Diagramme d'activités d'un Eleveur en saison des pluies : gestionLots_pluies(). L'éleveur privilégie l'élevage sans abandonner pour autant les autres cultures.

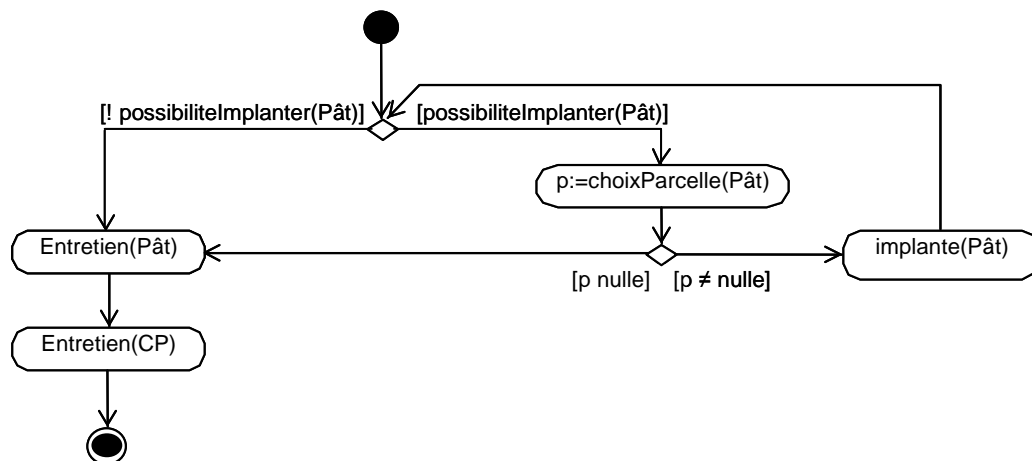


Figure 18 : Diagramme d'activités d'un Eleveur en saison sèche : gestionLots_sèche().

Changement de stratégie

Le diagramme de séquence suivant illustre un exemple de scénario de changement de stratégie, du Planteur vers l'Eleveur :

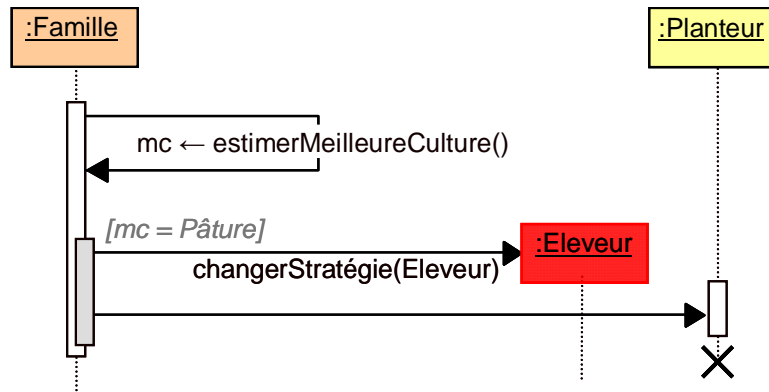


Figure 19 : Changement de stratégie. Diagramme de séquence d'un scénario de Planteur vers Eleveur

L'estimation de la "meilleure culture" n'est pas simple. Elle détermine les profits espérés de chaque type de couvert. Elle se base sur les possibilités financières, en main d'œuvre et en disponibilité des sols pour implanter chaque couvert. Ce profit espéré est également calculé en prenant en considération le revenu moyen effectif de chaque couvert productif, à la fois sur la propriété mais aussi sur l'ensemble de la vicinale.

$$\text{profitEspéré}(\text{culture}) = \text{profitGénéral}(\text{culture}) \times \text{nbParcellesImplantables}$$

$$\text{avec: } \text{profitGénéral}(\text{culture}) = (\text{profitMoy}_{\text{propriété}}(\text{culture}) + \text{profitMoy}_{\text{vicinale}}(\text{culture})) / 2$$

Le nombre de parcelles implantables est donné par le nombre de parcelles en forêt ou en jachère sur lesquelles l'agent a les moyens (en main d'œuvre et/ou financiers) d'implanter une culture donnée. Au final, l'algorithme pour estimer la meilleure culture est le suivant :

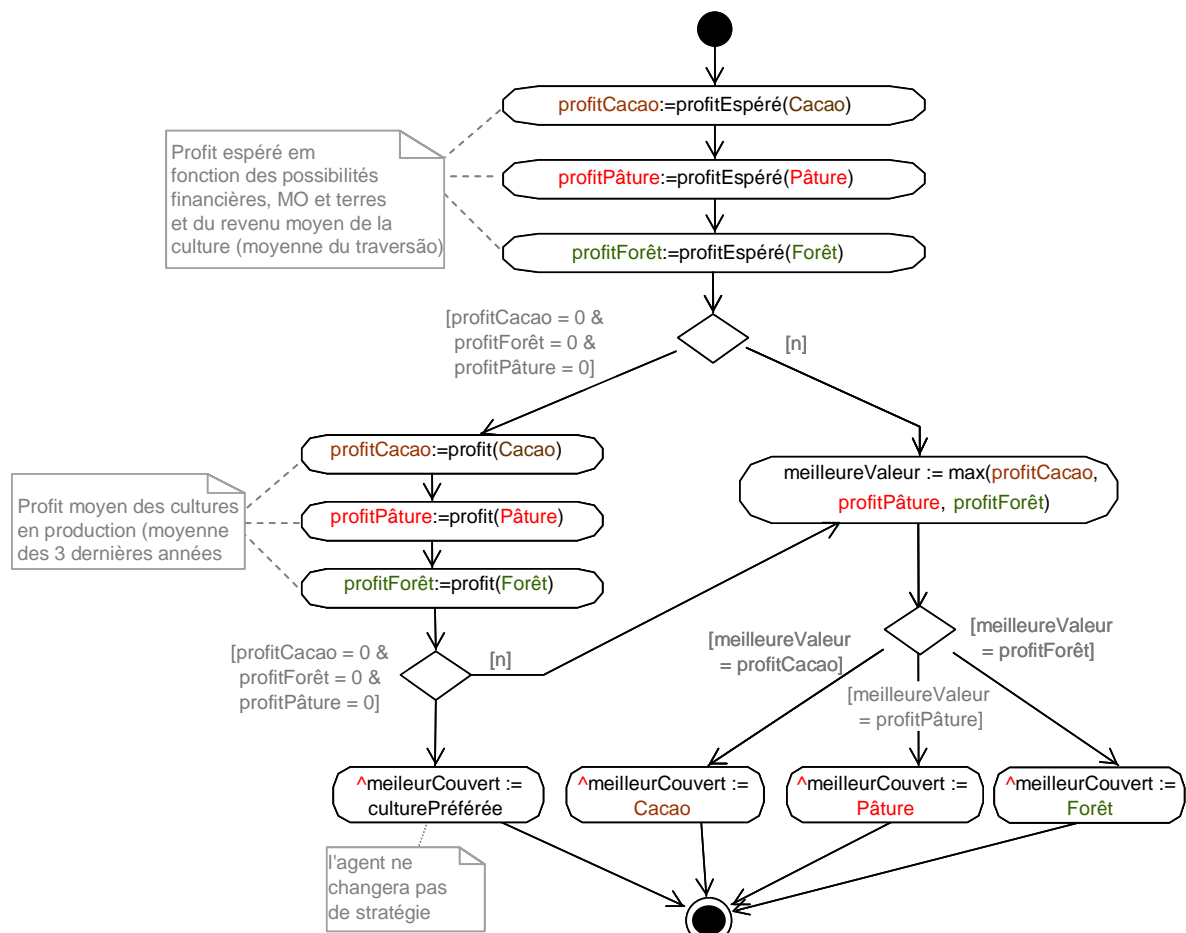


Figure 20 : Diagramme d'activité pour estimer le meilleur couvert (estimerMeilleureCulture)

Echanges de lots par la technique du commissaire-priseur

Dans *TransAmazon*, l'agent vend un lot à l'agence immobilière et lui achète ceux qu'elle propose.

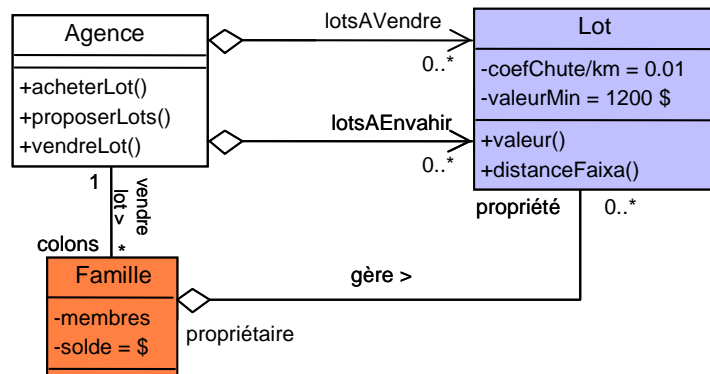


Figure 21 : Détail du diagramme de classes montrant les relations entre Famille et l'Agence

Lors de son bilan annuel, une famille en difficulté peut vendre des arbres de valeur, puis si ce n'est pas suffisant, elle vend du bétail. Si ce n'est toujours pas suffisant elle vend un lot :

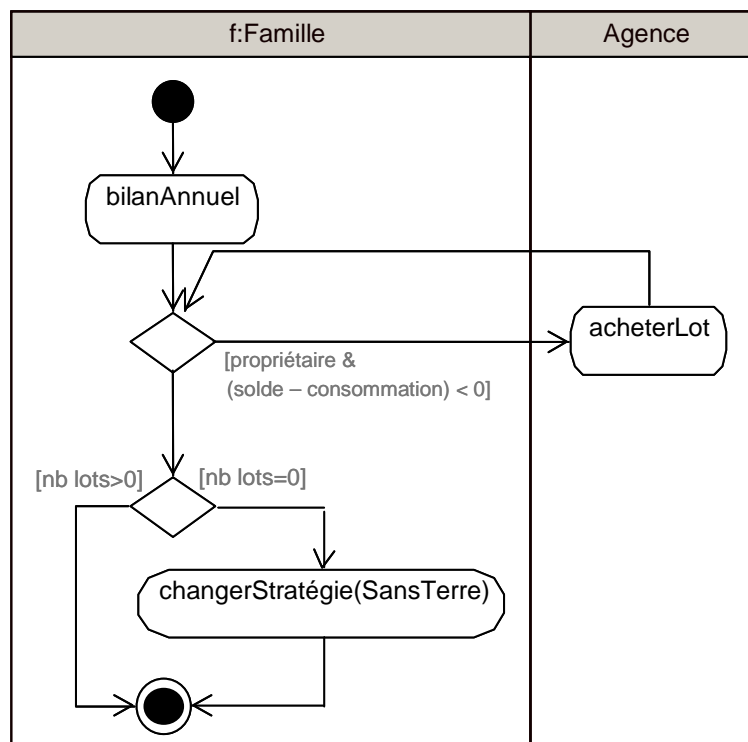


Figure 22 : La vente d'un lot d'une famille en banqueroute (Diag. d'activité)

Après les bilans, tous les agents reçoivent des propositions de lots à vendre par l'agence. Ceux qui en ont les moyens et pour lesquels le taux de déforestation de la propriété est supérieur à 50 % (norme fixée par l'état) proposent alors un prix pour le lot de leur choix (prix de base). Si personne d'autre n'est intéressé par ce lot, la vente est conclue à la valeur proposée par l'acheteur. Par contre, si un lot donné intéresse plusieurs agents, une pseudo-vente aux enchères est organisée : la vente est conclue en vendant le lot à

l'agent le plus offrant¹³⁷. On estime ainsi que les enchères sont montés jusqu'à une valeur maximale qui ne permet pas au deuxième acheteur potentiel le plus riche de renchérir. Le prix de vente est fixé par l'agence sur l'offre du deuxième acheteur, plus 1\$. L'algorithme suivant décrit ce procédé de vente :

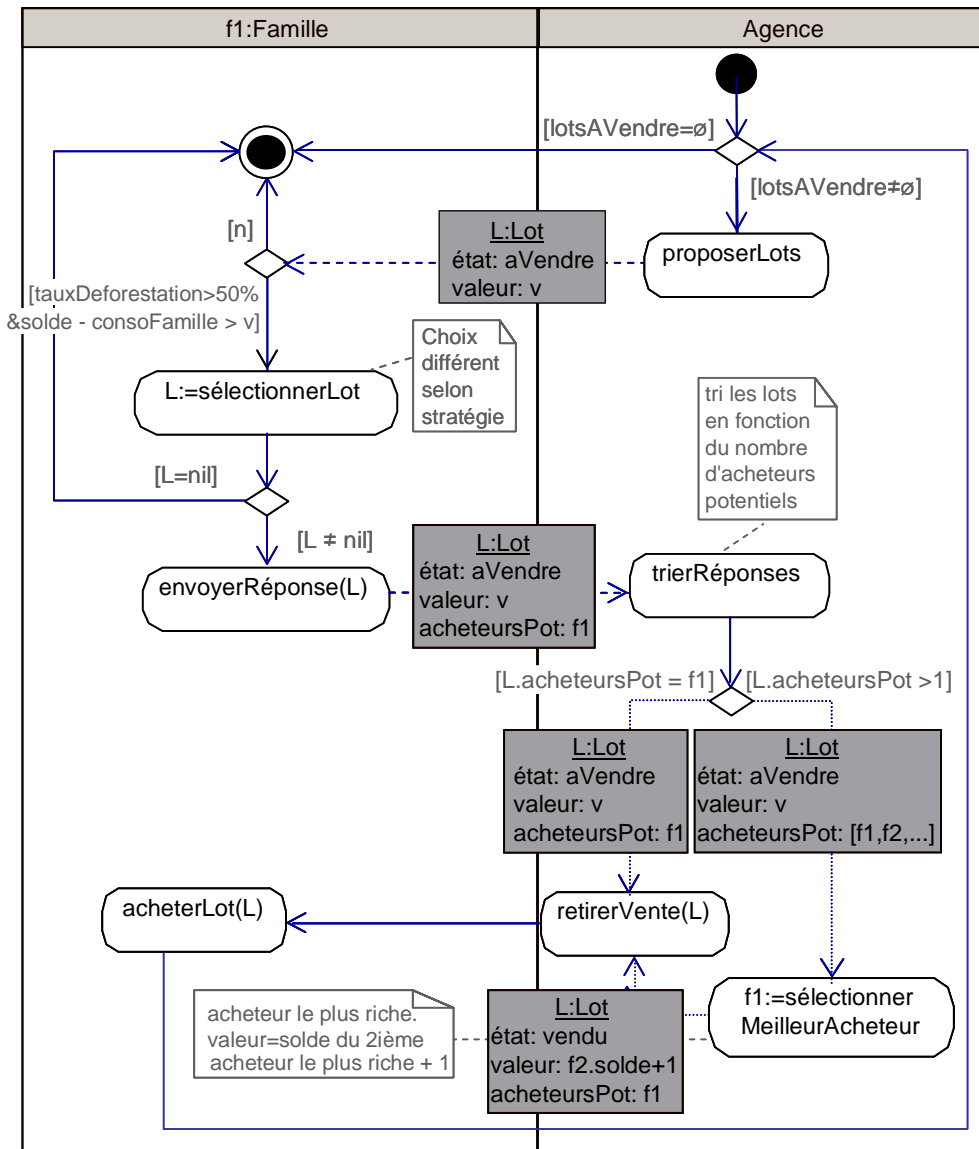


Figure 23 : Vente d'un lot par l'agence, selon un procédé centralisé de type vente au plus offrant (Diagramme d'activités en swimlines et objet flow)

¹³⁷ L'offre maximale proposée est au plus égale à 30% de la valeur du lot. Pour un Sans-Terre elle vaut : $offreMax(lot, agent) = Min(1, 3.valeur(lot) ; solde(agent) - consoAnnuelle(agent))$.

Pour un exploitant elle vaut au maximum 30% de la valeur du lot si le taux de déforestation de sa propriété est de 100% :

$$offreMax(lot, agent) = Min \left(valeur(lot) \times \left(1 + 0,3 \cdot \frac{txDeforestation(agent) - txLégal}{txLégal} \right) ; \right. \\ \left. solde(agent) + valeurBetail(agent) - consoAnnuelle(agent) \right)$$

avec $txDeforestation$ = le taux de déforestation de la propriété de l'agent et $txLégal$ = le taux légal autorisé de déforestation (50% initialement et 20% depuis la nouvelle loi sur l'environnement).

Quelques résultats

L'exemple suivant illustre une simulation sur 25 ans. A partir d'un espace vierge sur lequel deux vicinales ont été percées sur 44 km (100 lots), 400 familles sont créées et 200 d'entre-elles ont reçu un lot. La stratégie pour chacune de ces familles propriétaires est tirée aléatoirement (50% de chance de commencer éleveur ou planteur).

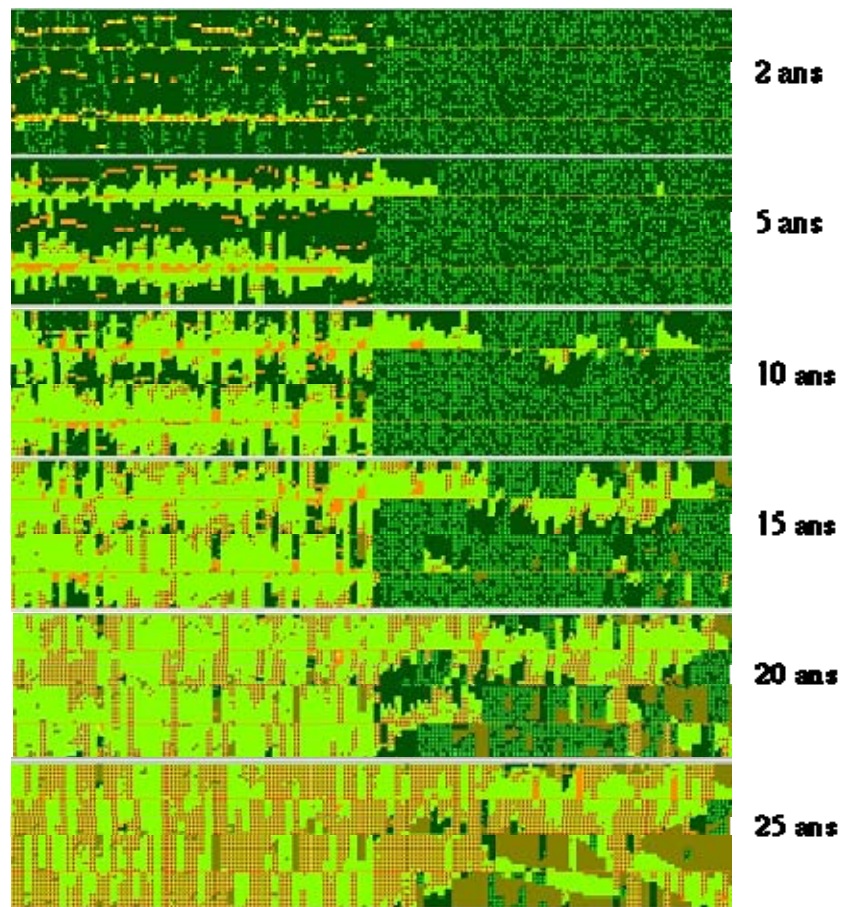


Figure 24 : 25 ans d'évolution du paysage à partir d'une simulation standard (2 vicinales)

En fonction des configurations initiales, la répartition des cultures change. Mais on observe régulièrement une utilisation des lots qui conduit à une déforestation et à une conformation du paysage en arête de poisson.

Prix du cacao = 1 \$/kg

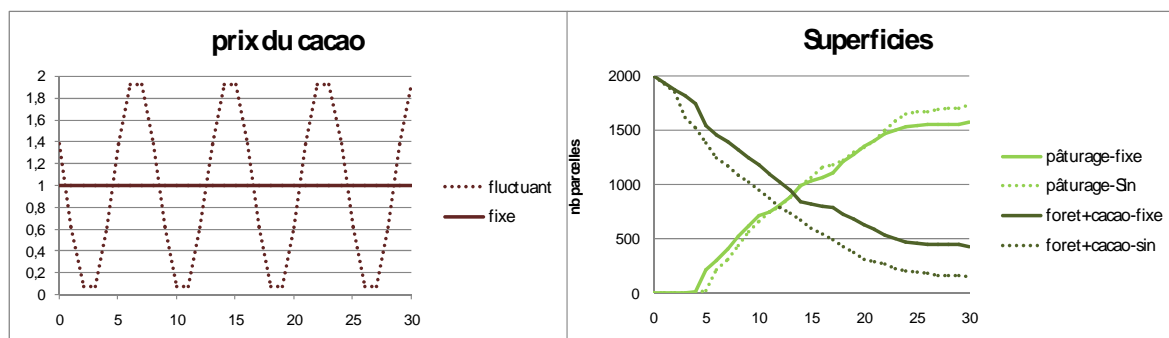


Figure 25 : Evolution des couverts en fonction de la variabilité du prix du cacao

Pour une même valeur moyenne du prix du cacao (1\$/kg), les conséquences en termes de déforestation sont sensibles : avec un prix stable, la déforestation est moins accentuée

et dans le même temps, le niveau de vie des agents est meilleur. Ceci est un exemple de situation gagnant-gagnant.

Indemnisation pour la préservation de la forêt.

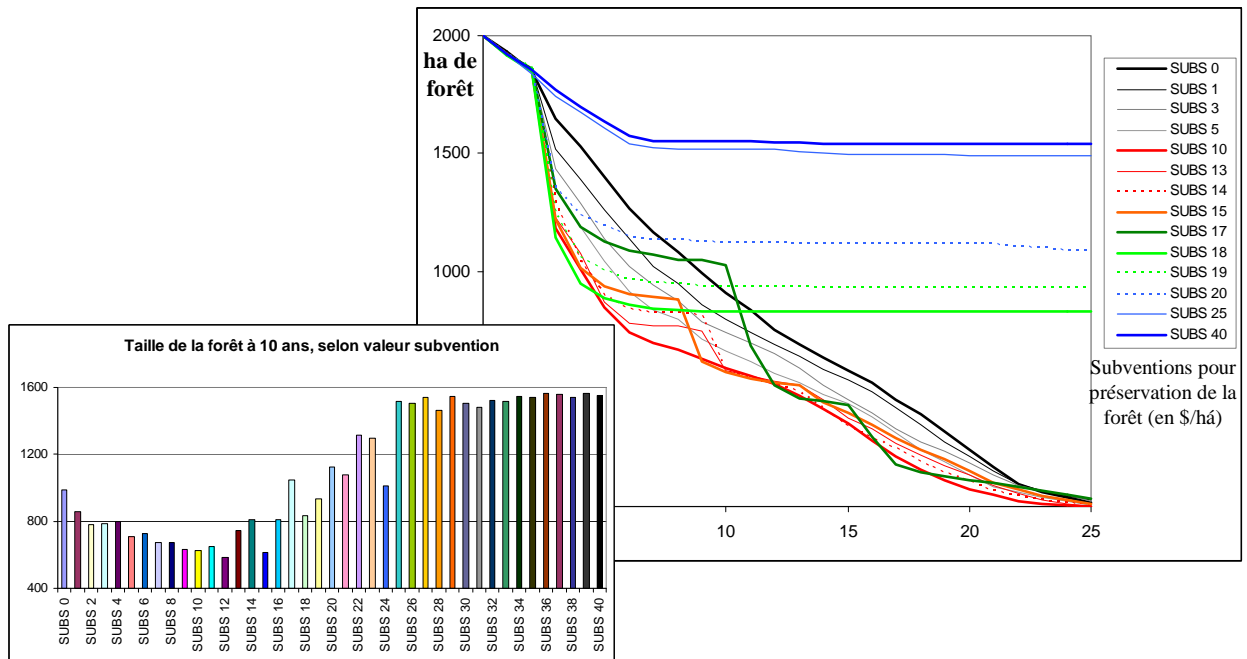


Figure 25 : Evolution de la taille de la forêt en fonction de la hauteur de l'indemnisation (subs = subside, en \$/ha de forêt).

Pour des valeurs d'indemnisation inférieures à 10 \$/ha de forêt, le résultat d'une politique d'indemnisation serait pire que de ne rien faire. A partir de 18 \$/ha, la déforestation s'arrête, mais seulement après une période de 10 ans qui se montre très redoutable. A partir de 21 \$/ha, la politique semble efficace et il n'est pas nécessaire de monter au-delà pour espérer encore mieux.

Analyse de sensibilité

La figure suivante regroupe 3 diagrammes représentant chacun la sensibilité locale des indicateurs « taille de la forêt », « capital global » (capital foncier et financier, sommé sur tous les agents de la communauté) et « équité sociale » (nombre initiaux de familles moins nombre d'exclus et de sans-terres en fin de simulation). Cette figure est plus explicite que la sensibilité locale agrégée, présentée sur la Figure 11-21 (p. 266).

Si les paramètres liés à l'aspect social prédominent pour les trois indicateurs, la réponse de ces derniers varie en fonction des autres paramètres. On remarque aussi que l'équité sociale est seulement sensible aux paramètres familiaux, alors que l'indicateur environnemental réagit davantage aux coûts d'exploitation (en main d'œuvre et en argent) des cultures.

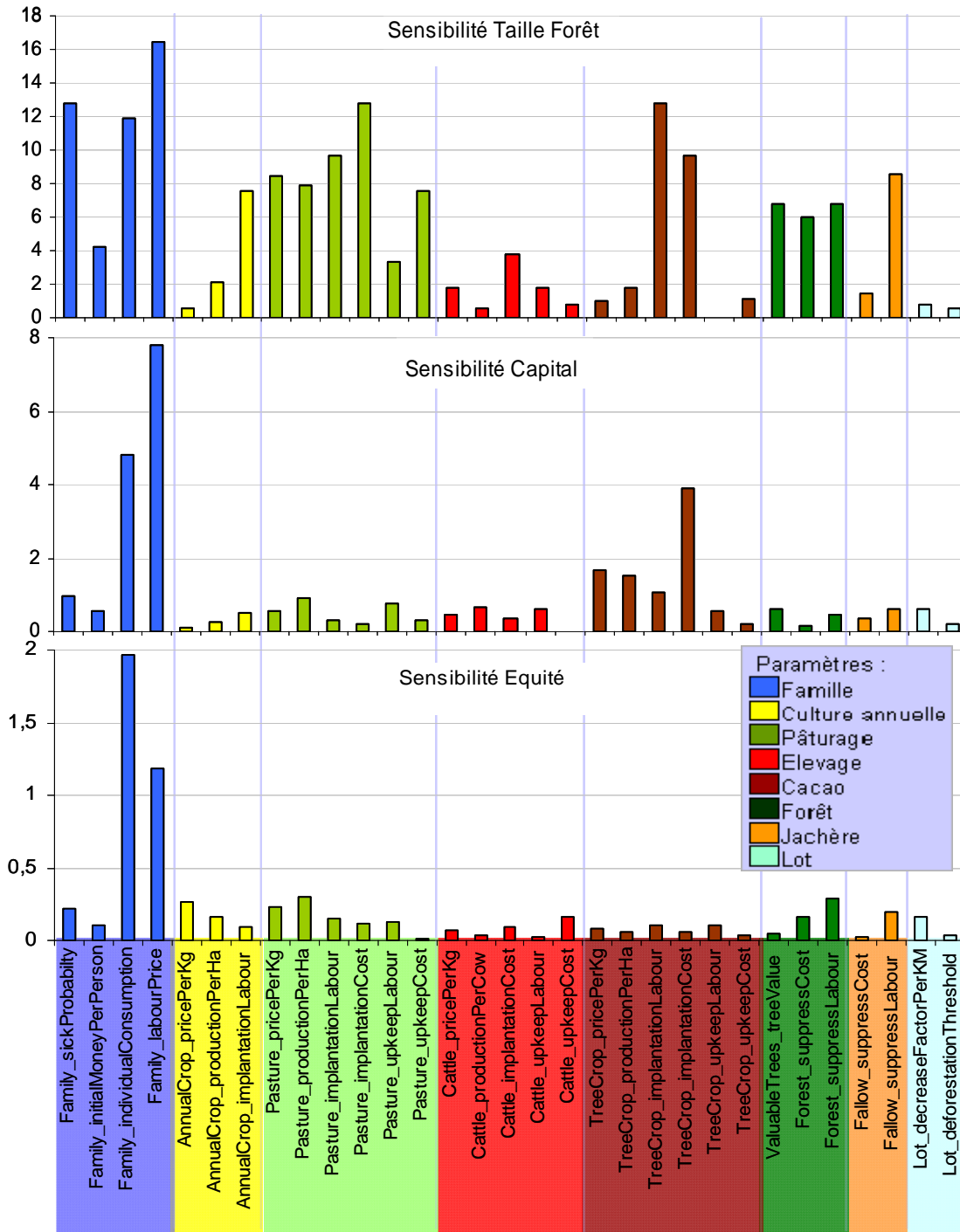


Figure 26 : Sensibilité de 3 indicateurs du développement durable à 31 paramètres du modèle.

Protocole ODD

Pour rappel, le tableau ci-dessous montre l'organisation du protocole ODD :

Overview	Purpose
	State variables and scales
	Process overview and scheduling
Design concepts	Design concepts
Details	Initialization
	Input
	Submodels

Tableau 2 : Les trois parties et les sept éléments du protocole ODD, d'après [Grimm et al., 2006]

Les points suivants présentent les sept éléments de ODD appliqués à *TransAmazon*. Même si les auteurs à l'initiative de ce protocole n'utilisent ni ne conseillent l'utilisation d'UML, j'en fais un large usage. Car, comme expliqué au chapitre 9, je considère que les diagrammes UML sont d'excellents outils pour présenter un SMA à condition bien sûr de soigner la mise en forme afin de proposer des modèles compréhensibles par tous. Afin d'éviter les répétitions, les diagrammes ne sont pas recopiés ici ; ils sont remplacés par des références à ceux déjà présentés au chapitre 11 et dans cette annexe (une version complète, avec les diagrammes est disponible sur <http://cormas.cirad.fr/fr/applica/Transamazon.htm>).

Overview

L'objectif du modèle (*purpose*). *TransAmazon* a pour objectif de mieux comprendre les activités des petits colons des fronts pionniers amazoniens qui conduisent à la déforestation. Malgré des évolutions des questions de recherche au cours du processus de modélisation, les objectifs initiaux restent inchangés (cf. chap. 11.3 pour plus de détails):

- Comment les producteurs utilisent la terre ?
- Quelles sont les points clés qui influencent les dynamiques d'utilisation du sol ?

Les échelles et les variables d'état (*state variables and scales*). L'échelle spatiale minimale est la parcelle de une "alqueire" (unité de mesure des fermiers, 5 ha). Le niveau du dessus est le lot de 100 ha (20 parcelles). La vicinale (*travesão*) est l'échelle maximum du modèle et peut mesurer de 2 à N lots. On peut aussi initialiser le simulateur sur plusieurs vicinales. Voir le diagramme d'agrégation d'entités spatiales de la figure 11-6 (p. 252).

Les paramètres et leurs valeurs sont présentés sur les diagrammes de classe du chapitre 11 (fig. 11-6, 11- 8, 11-9 et 11-12 et tableau 11-1) ainsi que dans cette annexe (fig. 15, tableau 1).

Vue d'ensemble des processus et de la gestion du temps (*process overview and scheduling*). La dynamique du modèle s'appuie sur une évolution par "pas de temps". Celui-ci correspond à une année mais il est subdivisé en trois périodes : la saison des pluies, la saison sèche et le bilan annuel. A la fin de chaque période, les entités sont synchronisées, ce qui signifie qu'elles ont toutes agit une seule fois et que l'état du monde est identique pour toutes. L'ordre d'activation des agents est séquentiel sans brassage aléatoire. Voir explications au paragraphe 11.5.1 et diagramme de séquences 11-13. Par faute de dynamique sur l'évolution familiale (pas de vieillissement, ni de reproduction), l'horizon de simulation est limité à 30 ans maximum.

Design concepts

- Aléatoire : le modèle n'est pas déterministe. Les seuls événements aléatoires ayant lieu au cours d'une simulation, surviennent pour déterminer le nombre de malades dans chaque famille. En début de chaque période (saison des pluies et saison sèche, cf. fig 11-15), chaque agent exécute la méthode *majMOactive()* au cours de laquelle il répète un test probabiliste qui décide pour chaque membre de la famille si la personne est malade ou non. Les autres possibilités de voir apparaître des événements aléatoires ont lieu lors de l'initialisation du simulateur : répartition des sols, des arbres de valeurs et des agents ainsi que le nombre de membre par famille et leur répartition (actif ou inactif, cf. table 1) et la stratégie initiale.
- Regroupement : les agents ne sont pas regroupés en collectifs réifiés.

- **Emergence** : pour chaque stratégie, la succession des activités agricoles est imposée (cf. diagramme 11-15, page 260 qui décrit la séquence générale des activités d'un producteur, et diagrammes 18 et 19 de cette annexe), mais les simulations laissent apparaître des phénomènes émergents tels que la rotation des cultures annuelles mais aussi l'évolution des acteurs selon la typologie proposée par [Ferreira, 2001] (cf. fig. 11-19 et 11-20).
- **Décision** : c'est au moment de son bilan annuel que l'agent choisit sa prochaine stratégie agricole (fig. 20). Le diagramme d'activité de la figure 21 décrit la façon dont il estime le meilleur couvert et qui guidera sa décision (Planteur ou Eleveur). Le profit qu'il espère tirer de chaque type de couvert est calculé en prenant en considération le revenu moyen effectivement produit par un couvert donné. Ce revenu est calculé à la fois sur sa propriété mais aussi sur l'ensemble de la vicinale. Cette décision est donc influencée par les résultats agricoles de ses voisins. Dans la version décrite ici, les agents n'imaginent pas leur future. Mais dans une version récente du modèle, le choix de la prochaine stratégie est déterminé en imaginant des successions de stratégies dans le futur et en choisissant le meilleur itinéraire calculé de cette façon. En quelques sortes, il s'agit d'agents récurrents qui réalisent des simulations dans la simulation.

Details

L'initialisation consiste à créer un espace et y positionner des agents. Avec le simulateur développé sous Cormas, l'utilisateur peut choisir :

- la dimension de l'espace : nombre de vicinales et longueurs (nombre de lots / vicinale). Les sols sont alors créés et répartis de façon aléatoire mais en respectant les proportions (10% de terre Roxa, 40 % de Mista et 50 % d'Amarela). On peut aussi choisir de charger une carte prédéfinie des sols. Tout l'espace initial est couvert de forêt. Sur chaque cellule, il y a une chance sur deux d'avoir 2 arbres de valeurs.
- L'utilisateur peut aussi choisir la proportion d'agents fermiers qui occuperont les N premiers lots de l'espace. Puis le simulateur crée autant de sans-terres qu'il y a de lots libre. Différentes méthodes d'initialisation permettent de créer des fermiers (qui possèdent un lot) en choisissant les stratégies initiales : tous éleveurs, tous planteurs ou 50 % de chaque. Les membres et le nombre d'inactif par famille sont déterminés aléatoirement en suivant les probabilités fixées par le tableau 1.
- Il est possible d'initialiser le modèle sur un état prédéfini.

Les variables d'entrées (Inputs). Aucune variable de forçage (alimentée au cours d'une simulation par des données externes) n'est utilisée.

Les sous-modèles (Submodels). Les équations présentées au chapitre 11 (valeur d'un lot, marge brute d'un couvert, production effective, etc., page 256) et dans cette annexe peuvent être considérées comme des sous-modèles de *TransAmazon*.

Cette description de *TransAmazon* par le protocole ODD constitue une première. En effet, ODD a été prévu préférentiellement pour les modèles de l'écologie. A l'instar de [Pohill et al., 2008] qui l'ont expérimenté pour un modèle d'agents sociaux, il s'agit d'un premier test appliqué à un SMA traitant de gestion des ressources renouvelables. Reste encore à savoir si cette description est assez claire et suffisante pour permettre la réplique du simulateur et retrouver des résultats similaires...

Résumé

Le paradigme multi-agent qui propose une manière originale de modéliser le monde, est considéré comme un mode pertinent de représentation des connaissances. Mais ces potentialités ne doivent pas cacher les difficultés qui guettent le modélisateur. Souvent sous-estimées, celles-ci peuvent remettre en cause sa légitimité scientifique. La question de la validation des SMA est soulevée et plus spécifiquement leur fiabilité. Contrairement aux modèles mathématiques, un SMA ne peut pas prouver ses résultats ni s'abstraire de la simulation. Lors du passage de sa conception à son implémentation, de nombreux artefacts peuvent apparaître. Certains sont liés à des erreurs de programmation ou de calcul, mais la plupart proviennent d'une gestion approximative du temps et des interactions entre agents. On risque ainsi d'attribuer par erreur des propriétés à un modèle. Or la technique informatique seule ne résout pas ces biais. Le concepteur doit connaître les zones sensibles susceptibles de générer des artefacts et les considérer dans le cadre du domaine traité. Après avoir mené des analyses exploratoires, il contrôle mieux son système et est capable d'expliquer tous les résultats produits. Pour renforcer la fiabilité du simulateur, il est aussi nécessaire de le répliquer de façon indépendante, à l'instar de toute démarche scientifique rigoureuse. Or les difficultés de la réplication sont souvent dues au manque de lisibilité des SMA. Si la parfaite explicitation reste un idéal, il est indispensable de présenter un SMA de façon claire et non ambiguë à l'aide de diagrammes réorganisés qui mettent la lumière sur les points essentiels et permettent des discussions et des critiques.

Mots-clés : méthodologie, système multi-agent, modélisation, ressources renouvelables, validation, fiabilité

TITRE en anglais : Definition of a methodological framework for designing multi-agents models adapted to the renewable resources management

Abstract

The potentialities of the MAS should not hide the difficulties the modelisator can encounter. More precisely, the question of models validation is regularly mentioned. The probabilities of revealing errors or bugs are not negligible. One can then legitimately wonder about the reliability of the simulators. However, the main problems don't come from errors of coding but rather from the management of the interactions or activations of the agents. Often underestimated, a rough management may produce artifacts and one can give by mistake the wrong properties to a model. Some techniques limit the emergence of this kind of bias by reinforcing for example the autonomy of the agents. Nevertheless, they are difficult to implement. It is rather worthy to be aware of the hot areas that may generate artifacts and to use standard procedures by adapting them to the modeled field. Modeling of the socio-ecosystems is not just a data-processing speciality, but request a confirmed know-how and the modelisator must take a critical look at its own tools. It is required to improve their robustness by showing that they exhibit relatively stable behaviors. The independent replication of a simulator reinforces its reliability. Indeed, to check and reproduce experimentation appear as the rule of any rigorous scientific method. But the difficulties of replication are affected by miss readability of the MAS. It is thus essential to describe it in a clear and non-ambiguous way. A work of re-presentation must be carried out to design reorganized diagrams that put the light on the essential points of the model and authorize discussions and criticisms.

Keywords: Methodology, Multi-Agent System, Modeling, Renewable Resources, Validation, Reliability

DISCIPLINE : INFORMATIQUE et MODELISATION

LIRMM – Université de Montpellier 2, I2S UMR 5506 - CC 477. 161 rue Ada Montpellier cedex 5	CIRAD – Département ES - UPR Green Campus international de Baillarguet Montpellier cedex 5
---	--